



# **Evolución Microestructural De Chapas Metálicas Bajo Procesos De Larga Deformación**

**Autora: Jihane Del-lero Moreau**

**Tutora: Elisa María Ruiz Navas**

**Curso: 2008/2009**

**PFC Ingeniero Industrial**

**Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales**

**Escuela Politécnica Universidad Carlos III de Madrid**

# **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a mi familia y amigos

En segundo lugar, a mi tutora en la Carlos III, Elisa, por su ayuda y confianza.

En tercer lugar, a la KU Leuven y en concreto al MTM por haberme permitido realizar este trabajo con ellos.

Finalmente, a los profesores y técnicos del MTM, Prof. Van Bael and Prof. Van Houtte, Kris, Paul, Richard, Ivan, Rudy, Jo y sobre todo a mi tutor, Philip

# **PREFACE**

To my family and friends,

To my Spanish tutor, Elisa

Thanks to the MTM,

Thank to my promoters: Prof. Van Bael and Prof. Van Houtte, to all the technicians and professors that helped me, Kris, Paul, Richard, Ivan, Rudy, Jo and above all, to Philip

## **RESUMEN**

En el presente proyecto se ha llevado a cabo un estudio comparativo entre dos procesos de fabricación: el SPIF (single point incremental forming) o conformado incremental y el Dome Test, ensayo que simula un proceso de embutición.

Los materiales utilizados para esta comparativa han sido dos tipos distintos de acero, DC01 y DC06 y un tipo de aluminio AA3103

En primer lugar se ha obtenido el diagrama límite de conformado de los materiales usando el Dome Test. Seguidamente se han utilizado las piezas obtenidas por SPIF para obtener el ángulo límite de la pared, es decir, ángulo máximo de inclinación de la pared sin que se produzca la fractura de la probeta, y la distribución del espesor en la pared de las probetas. Una vez obtenidos los resultados anteriores se ha procedido a la medición del ángulo de deformación tangencial mediante el uso de un método innovador. Esto ha permitido demostrar la existencia de deformación tangencial en este proceso y, por tanto, explicar la mayor deformación en el estado de deformación plana en el proceso SPIF. Este método también ha permitido medir la deformación total del material. Por otro lado, se ha procedido al estudio de la influencia del ángulo de inclinación de la pared, del diámetro de la herramienta utilizada en SPIF y del espesor del material en el ángulo de deformación tangencial.

Finalmente, se ha realizado un estudio microestructural de las probetas para ver la evolución de la microestructura en el proceso de conformado incremental.

Este trabajo se divide en dos partes. La primera consiste en un resumen en castellano del trabajo realizado, mientras que la segunda, es el texto íntegro en inglés.

## **SUMMARY**

This Master's thesis deals with the difference between two deformation processes: the single point incremental forming process and the forming limit dome test. The materials used in this analysis were two different kinds of steels, DC01 and DC06 and aluminium AA3103.

The forming limit diagram was first obtained using the Dome test. Then, the thickness profile for SPIF tested samples was obtained in order to obtain the limiting wall angle and the thickness distribution. Then, in order to explain the higher formability in plane strain state of the incremental process, the shear angle was measured to prove the presence of through thickness shear with an innovative method. The influence of the wall angle, the tool diameter and the thickness of the sheet on the shear angle was studied. The use of this new method has been studied as well by measuring the strain. Finally, a microstructural analysis of the samples was done to see the evolution of the microstructure in the incremental forming process.

# ÍNDICE

1. ANTECEDENTES .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO (FLD) .....	1
1.3. LEY DE SINE .....	3
1.4. EXPERIMENTOS REALIZADOS EN SPIF .....	3
1.5. VENTAJAS DEL SPIF.....	6
 2. MATERIALES UTILIZADOS .....	 7
 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL. DOME TEST .....	 9
3.1. REALIZACIÓN DE ENSAYOS.....	9
3.1.1. INTRODUCCIÓN.....	9
3.1.2. ENSAYOS CON DC01 .....	10
3.1.3. ENSAYOS CON DC06.....	11
3.1.4. PROCESO DE MEDICIÓN .....	13
3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	15
3.2.1. RESULTADOS DC01 .....	15
3.2.2. RESULTADOS DC06.....	17
 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL. SPIF .....	 19
4.1. REALIZACIÓN DE ENSAYOS.....	19
4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	19
4.2.1. MEDIDA DEL ESPESOR.....	19
4.2.1.1. RESULTADOS DEL ALUMINIO .....	21
4.2.1.2. RESULTADOS DEL DC01 .....	22
4.2.1.3. RESULTADOS DEL DC06 .....	24
4.2.2. ÁNGULO DE DEFORMACIÓN TANGENCIAL.....	25
4.2.2.1. RESULTADOS DEL ALUMINIO .....	29
4.2.2.2. RESULTADOS DEL DC01. ....	31



5. ESTUDIO MICROESTRUCTURAL.....	34
5.1. MÉTODO.....	34
5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	35
5.2.1. RESULTADOS DEL DC01 .....	35
5.2.2. RESULTADOS DEL DC06 .....	37
6. CONCLUSIONES FINALES .....	39
7. REFERENCIAS .....	42

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La industria del conformado de metales esta en continua búsqueda y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el ahorro de tiempo y costes.

Las tecnologías tradicionales resultan costosas debido al alto coste de equipos, punzones, y matrices que han de ser fabricados con un perfil muy parecido al de la pieza final, y debido también al tiempo de set-up de las máquinas. Por tanto, estas tecnologías sólo resultan rentables para grandes lotes de producción. Por otro lado, las tecnologías tradicionales permiten alcanzar un alto nivel de automatización renunciando, sin embargo, a la flexibilidad.

En las últimas décadas las industrias metalúrgicas tienen que hacer frente a nuevas necesidades como la producción de lotes más pequeños y la constante demanda de procesos más flexibles. Todas estas nuevas necesidades se contradicen con las tradicionales tecnologías de fabricación por conformado y han dado lugar a la aparición de las tecnologías que utilizan el conformado incremental.

El conformado incremental es un proceso tecnológico innovador en el que una plancha de metal es deformada plásticamente gracias a la progresiva acción de un punzón de pequeño tamaño cuyo movimiento es controlado por un máquina de control numérico. De este modo, la herramienta deforma el material mediante un proceso de estiramiento casi puro.

Tanto con el Dome Test como con el SPIF (single point incremental forming) se obtiene el mismo resultado global de deformación (estado de deformación plana); sin embargo, la diferencia radica en cómo se llega a este estado. Se entiende por estado de deformación plana, al estado en el que la deformación normal en una de las direcciones del plano de la chapa es nula.

## 1.2. DIAGRAMA LÍMITE DE CONFORMADO (FLD)

La conformabilidad de una chapa metálica es generalmente definida como la habilidad que tiene el metal para deformarse hasta la forma deseada sin producirse la fractura o la reducción excesiva del espesor por estricción.

Cualquier tipo de metal sólo puede deformarse bajo estas condiciones hasta unos valores límites. Los diagramas de límites de conformado representan estos límites.

A continuación, en la Fig.1.1 puede verse una representación general de este tipo de diagramas. En la parte izquierda del diagrama, las deformaciones en las dos direcciones del plano de la chapa tienen sentido opuesto, una es negativa y otra es positiva y abarca todos los estados desde un ensayo de tensión hasta el estado de deformación plana, que es cuando uno de los dos valores de deformación es cero. En el lado derecho, ambas deformaciones son positivas y reúne todos los estados posibles que van desde el estado de deformación plana hasta el estado de estirado biaxial.

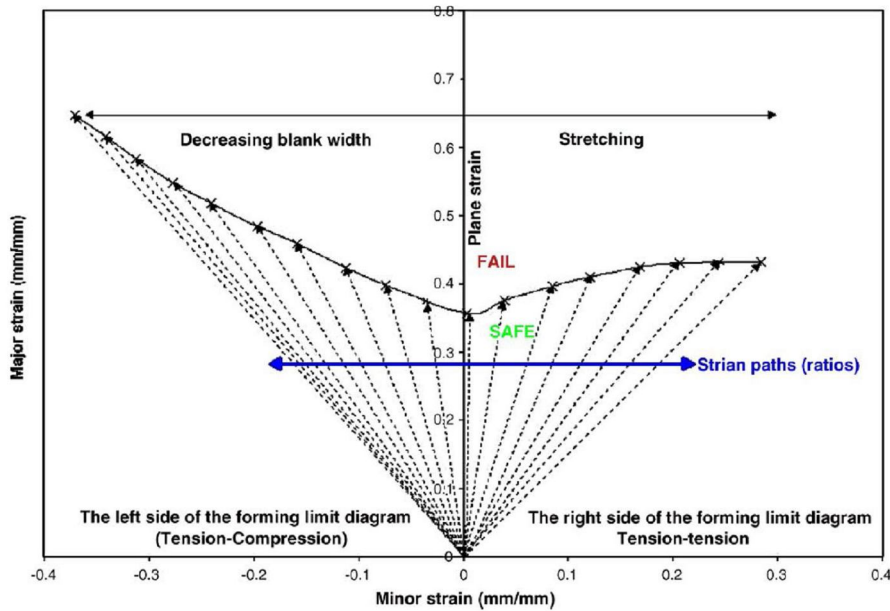


Fig.1.1. Representación esquemática del diagrama límite de conformado

Los valores a los que pueden llegar las deformaciones sin que se produzca la fractura del componente son conocidos como los límites de conformado.

Los diagramas límites de conformado consisten en un conjunto de curvas de conformado en el plano de las deformaciones principales. El diagrama límite de conformado es considerado como una propiedad del material; sin embargo, es función de los parámetros del proceso. Es por esta razón, que los diagramas límite de conformado para el proceso SPIF y para el Dome Test (procesos que van a ser comparados a lo largo de este documento) presentan curvas distintas.

En la Fig.1.2 se puede observar la diferencia entre estas dos curvas. En este caso, el material utilizado para ambos casos es aluminio AA1050-0 (aluminio prácticamente puro). En esta figura se puede ver como se consiguen mayores deformaciones con un proceso de conformado incremental que con un proceso de conformado tradicional. Esta diferencia se debe a la peculiaridad de los procesos mecánicos que ocurren durante el conformado incremental. La deformación plástica inducida por la herramienta es muy localizada y está confinada en el área de contacto vecino y va progresando incrementalmente con el movimiento de la herramienta según la trayectoria asignada. Como consecuencia, se alcanzan mayores deformaciones en el material antes de que se produzca la rotura de éste.

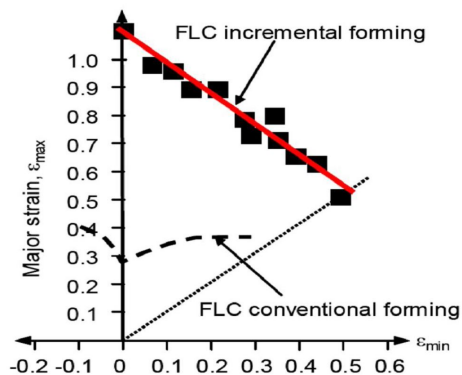


Fig.1.2 Curvas de conformado convencional y de conformado incremental para el AA1050-0

Finalmente, cabe mencionar que la curva de conformado para un proceso de conformado incremental generalmente tiene la forma de una recta con pendiente negativa en el primer cuadrante, esto es, cuando las deformaciones principales del plano de la plancha son positivas

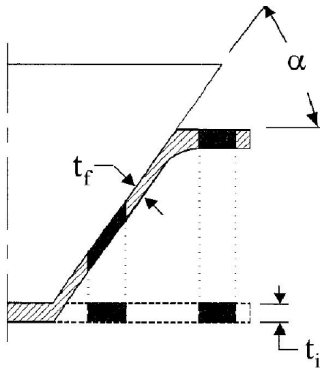
## 1.3. LEY DE SINE

La ley de Sine predice el espesor de la pared de una pieza conformada mediante un proceso de conformado incremental.

Según esta ley, el espesor final de la pared es función de la inclinación de la pieza final. Este espesor puede ser calculado de manera muy simple según la siguiente ecuación:

$$t_f = t_i * \text{sen} \alpha \quad (1.1)$$

En la Fig.1.3 se puede ver una representación de los términos involucrados en la ecuación (1.1). En esta ecuación se desprecian los desplazamientos internos de material y, por tanto, la deformación de la pared es bajo condiciones tangenciales puras.



**Fig.1.3 Deformación de un elemento bajo condiciones tangenciales**

La ley de Sine se basa en la conservación de volumen y la reducción del espesor se obtiene proyectando verticalmente el material desde su estado inicial a un estado final dado por una inclinación determinada de la pared. Existen desviaciones de este espesor final ya que, en la práctica, se obtienen unas regiones con espesor menor al predicho por Sine y otras con un espesor mayor al predicho dentro de la pared de un único cono. Sin embargo, dentro de un mismo cono ha de cumplirse el principio de conservación de volumen y, por tanto, este espesor final predicho por Sine ha de tomarse como la media de los espesores de los distintos puntos de la pared del cono.

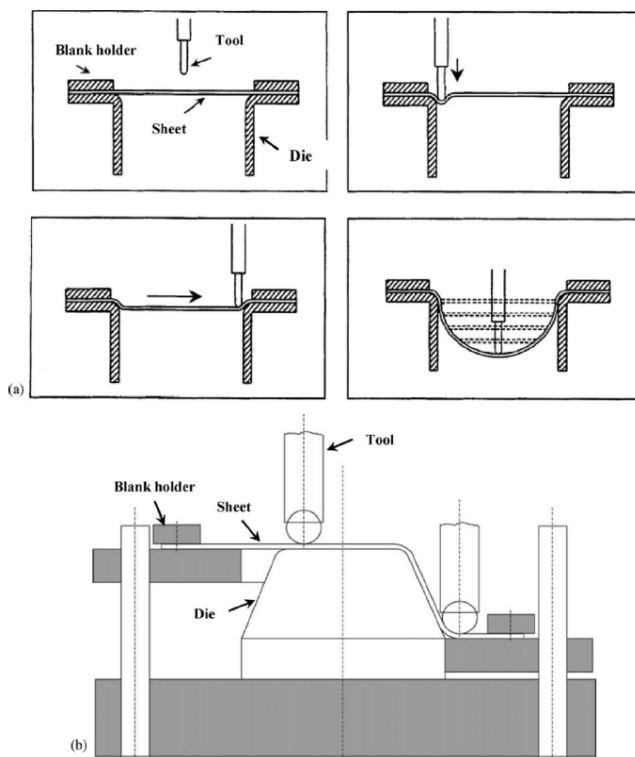
## 1.4. EXPERIMENTOS REALIZADOS EN SPIF

La idea básica de las operaciones de conformado incremental es la obtención de una pieza con la forma deseada mediante una herramienta de pequeñas dimensiones cuyo movimiento sigue una trayectoria determinada por el usuario. Por tanto, ya no son necesarios punzones y matrices convencionales ya que la forma final de la pieza sólo

depende de la trayectoria asignada a la herramienta y es obtenida al sumarse localmente las deformaciones plásticas inducidas por la herramienta a lo largo de su trayectoria.

Todas estas simples consideraciones se ven traducidas en una importante reducción de los costes asociados a las matrices y punzones, en una reducción de los tiempos asociados a los set-up, en un aumento del nivel de flexibilidad y en un aumento de la rentabilidad al fabricar lotes pequeños.

El proceso SPIF tiene dos variantes: conformado incremental negativo y conformado incremental positivo. La primera variante permite obtener piezas con zonas angulosas mientras que la segunda variante no lo permite. Ambas variantes pueden observarse en la Fig.1.4.



**Fig.1.4. Variantes del proceso SPIF**  
**(a) Conformado incremental negativo**  
**(b) Conformado incremental positivo**

Existen dos formas de expresar la conformabilidad en un proceso SPIF: mediante las curvas límites de conformado explicadas en el apartado anterior o bien mediante  $\alpha_{\text{máx}}$  que es el ángulo máximo de inclinación de la pared sin que se produzca rotura de la pieza.

Hay cuatro parámetros importantes en un proceso SPIF: el espesor de la chapa de metal, la dimensión de la herramienta utilizada (su diámetro), la velocidad de deformación (velocidad de movimiento de la herramienta) y, finalmente, la dimensión del salto hacia abajo ( $\Delta z$ ), que es el salto que realiza la herramienta en profundidad.

El estudio de la influencia del salto en profundidad ( $\Delta z$ ) y del ángulo de inclinación de la pared en el proceso SPIF ha sido estudiado por J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou y J. Allwood [Ref.]. Según este estudio, un mayor salto en profundidad produce una mayor rugosidad y un efecto de piel de naranja en la superficie

de la pieza. En cuanto al ángulo de inclinación de la pared se ha determinado que existe un valor límite en el máximo ángulo de inclinación que puede obtenerse de una sola pasada. También se ha observado una gran dependencia entre el ángulo de inclinación de la pared y el espesor de la chapa, produciéndose una distribución no homogénea del espesor cuando el ángulo de inclinación de la pared se acerca a su valor máximo.

E. Hagan y J. Jeswet [Ref.] han estudiado el cambio en las propiedades del material para el Al13003 después de haber sufrido un proceso de conformado incremental controlado por una máquina de control numérico mediante una serie de ensayos de tensión. Los resultados obtenidos en este estudio han permitido obtener una relación mediante la cual se observa un aumento del límite elástico ( $\sigma_y$ ) y del valor de la tensión en el punto de estricción para mayores valores del ángulo de inclinación de la pared. También se ha observado como el valor de la deformación en el punto de estricción disminuye linealmente al aumentar el ángulo de inclinación de la pared, dando lugar a un endurecimiento por deformación del material. Finalmente, se ha determinado una ecuación Hollomon para el Al3003 válida en todo el rango de deformación.

L. Fillice, L. Fratini y F. Micari [Ref.] realizaron un estudio del grado de deformación en un proceso de conformado incremental y se han desarrollado ensayos cuyo objetivo ha sido alcanzar distintas condiciones de deformación en el material y, consecuentemente, determinar las curvas límite de conformado para progresivas operaciones de deformación. Las conclusiones obtenidas han sido que los procesos de conformado incremental se caracterizan por mecanismos de deformación local que dan lugar a curvas de conformado que se diferencian de las tradicionales. También se indica la posibilidad de hacer uso de este tipo de diagramas como la herramienta CAE (computer aided engineering o ingeniería asistida por computadora) para diseñar procesos de conformado industrial.

G. Hussain, L. Gao y N. U. Dar [Ref.] han realizado dos ensayos para evaluar el grado de deformación de planchas de aluminio en un proceso de conformado incremental negativo. En el primer ensayo, una colección de conos y pirámides fue obtenida variando el ángulo de inclinación de la pared progresivamente a pequeños incrementos hasta obtener el ángulo de pared máximo sin rotura ( $\alpha_{\text{máx}}$ ). En el segundo ensayo se fabricaron pirámides con un valor del ángulo de inclinación de pared variable y se llevaron hasta la rotura. Lo primero que fue observado es que, en el primer ensayo, algunas de las piezas que tenían lados angulosos rompieron por esa zona, lo que demostró que las regiones angulosas sufrían una mayor deformación que los lados rectos para la misma trayectoria de la herramienta. La siguiente observación fue que los valores del grado de deformación obtenidos en el segundo ensayo eran mayores que los resultados obtenidos en el primer ensayo debido a que en el segundo ensayo el ángulo de la pared era variable, mientras que en el primer ensayo el ángulo de la pared era constante.

P. Eyckens, A. Van Bael y P. Van Houtte [Ref.] fueron los primeros en incluir el término de deformación tangencial en el modelo. Según este artículo, la aparición de la deformación tangencial contribuye al mayor grado de deformación obtenido en SPIF.

J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou y J. Allwood [Ref.] han realizado un estudio sobre el conformado incremental asimétrico que, según sus autores, tiene el potencial para revolucionar la industria del conformado del metal, puesto que puede alcanzar todos los niveles de fabricación. Se pueden obtener formas complicadas de una manera muy simple. Existen dos variantes de este proceso, una en la que sólo se

utiliza una herramienta para todo el proceso de conformado y otra en la que se utilizan dos herramientas de las cuales una es total o parcialmente un punzón.

### **1.5. VENTAJAS DEL SPIF**

Debido a todas sus ventajas el proceso SPIF representa una potente alternativa en la industria del conformado de metales.

La velocidad de producción de este nuevo proceso no es tan alta como la de los ya existentes; sin embargo, las ventajas que ofrece, como la alta flexibilidad, el bajo coste de las herramientas y el alto grado de deformación alcanzado en el estado de deformación plana lo hace rentable para la fabricación de pequeños lotes para varias aplicaciones. Se pueden citar las siguientes ventajas concretas:

- Rapid prototyping: utilizando SPIF resulta un proceso económico
- Este método produce grandes regiones con una deformación homogénea y evita los gradientes de tensión y de deformación
- Es capaz de fabricar componentes irregulares y productos médicos muy personalizados.

Sin embargo, aun teniendo en cuenta todas estas ventajas, sigue siendo un proceso que necesita ser estudiado con mayor detenimiento. Existen varios estudios relacionados con este tipo de procesos, sin embargo aun no se ha alcanzado su completo entendimiento.

En este proyecto se ha intentado obtener mayor información sobre el proceso de conformado incremental y se ha trabajado con algunas conclusiones y formulaciones obtenidas por estudios análogos anteriores.

## 2. MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales utilizados para este estudio han sido una aleación de aluminio AA3103 y dos aceros, el DC01 y el DC06. Las propiedades de cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades de los materiales utilizados

	AA3103	DC01	DC06
<b>Densidad</b>	2.6989 g/cm <sup>3</sup>	7.87 g/cm <sup>3</sup>	7.87 g/cm <sup>3</sup>
<b>Módulo de Young</b>	68.0 GPa	166 GPa	166 GPa

La Tabla 2.2 recoge la composición de cada uno de los materiales.

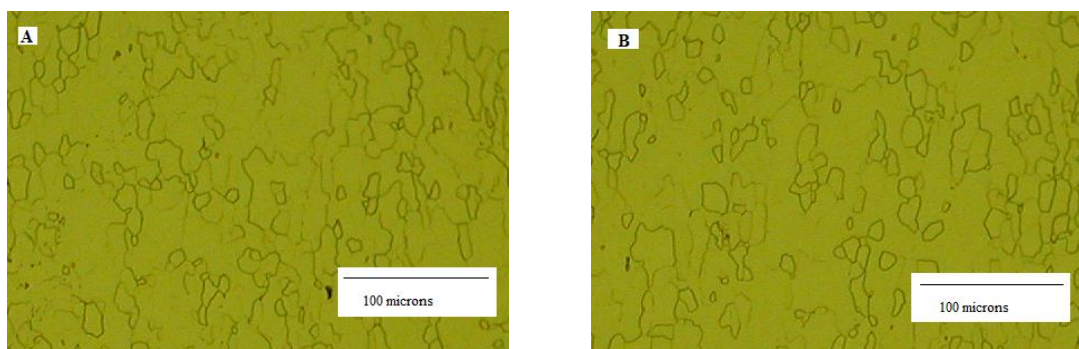
Tabla 2.2 Composición de los materiales utilizados

	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Zn (%)	Mg (%)	Ti (%)	Cr (%)	C (%)	P (%)	S (%)	Al (%)
<b>AA3103</b>	0.19	0.5	0.07	1.1	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	-	98.1
<b>DC01</b>	-	99.2	-	-	-	0.6	-	-	0.12	0.045	0.035	-
<b>DC06</b>	0.03	99.52	-	0.25	-	-	0.15	-	0.01	0.02	0.02	-

El estado inicial de cada material es:

- AA3103: completamente recocido (estado blando)
- DC01: recocido más consecutivos procesos de laminación. Sin galvanizar
- DC06: recocido más consecutivos procesos de laminación. Sin galvanizar

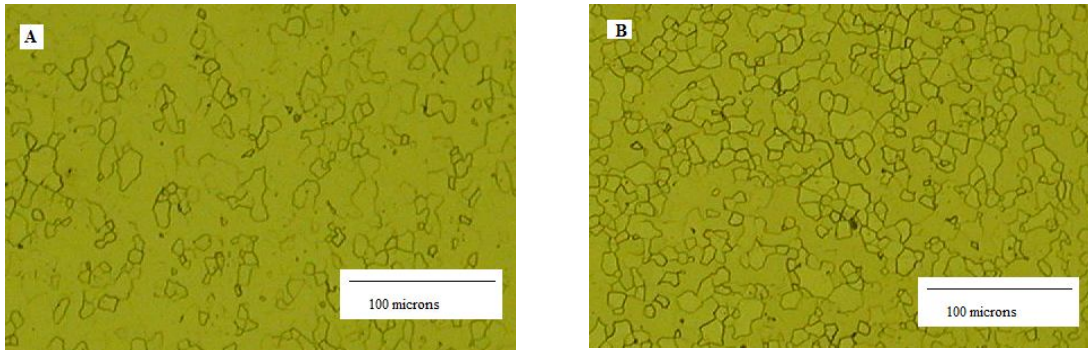
La microestructura inicial para el DC01 se muestra en la Fig.2.1.



**Fig.2.1. Microestructura del DC01. A) El eje vertical coincide con la dirección de laminación y el eje horizontal es la del espesor. B) El eje vertical coincide con la dirección transversal y el eje horizontal es la del espesor**

La microestructura inicial para el DC06 se muestra en la Fig.2.2.





**Fig.2.2 Microestructura del DC06. A) El eje vertical coincide con la dirección de laminado y el eje horizontal es la del espesor. B) El eje vertical coincide con la dirección transversal y el eje horizontal es la del espesor**

### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL. DOME TEST

El ensayo Dome Test es utilizado generalmente para determinar los diagramas límite de conformado de metales. La probeta es una plancha de metal que se sujeta en la máquina con anillos circulares y es deformada por un punzón con forma semiesférica. Para alcanzar los distintos estados de tensión se van variando las dimensiones de la probeta. Cada valor del ancho de la chapa dará lugar a una trayectoria, una curva de conformado.

En primer lugar, se ha buscado alcanzar el estado de deformación plana. Para ello, fue necesario encontrar el ancho exacto que da lugar a este estado y luego, ateniéndose a la norma, procurar que la fractura de la probeta se produzca en el centro de la misma. Para facilitar el trabajo, se han realizado todos los ensayos con unas buenas condiciones de lubricación, de esta forma se evitaron, en cierta medida, los problemas de fricción. Por otro lado, se ha de colocar la probeta en la máquina de tal forma que la deformación comience en el centro geométrico de la probeta para conseguir, en la medida de lo posible, un reparto simétrico de la fuerza y que el centro de la probeta sea el punto que alcanza mayor deformación (favoreciéndose al mismo tiempo una fractura centrada).

En segundo lugar, se ha buscado alcanzar el estado biaxial. Para ello, la simetría de la probeta ha de ser cuadrada. Con este resultado se obtiene un segundo punto del diagrama límite de conformado del material y, consecuentemente, la posibilidad de esbozar el lado derecho de éste.

### 3.1. REALIZACIÓN DE ENSAYOS

#### 3.1.1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos del “Limit Dome Height” han sido realizados en la máquina INSTRON 1196 (para más información el lector puede acudir al texto en inglés) que aparece en la Fig.3.1. Este ensayo ha sido realizado con los dos aceros, DC01 y DC06.

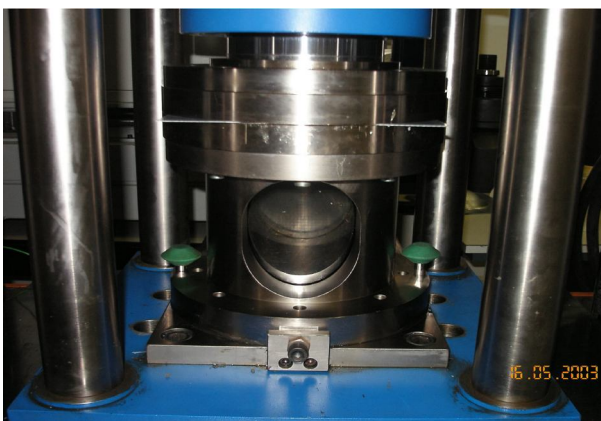


Fig.3.1 INSTRON 1196

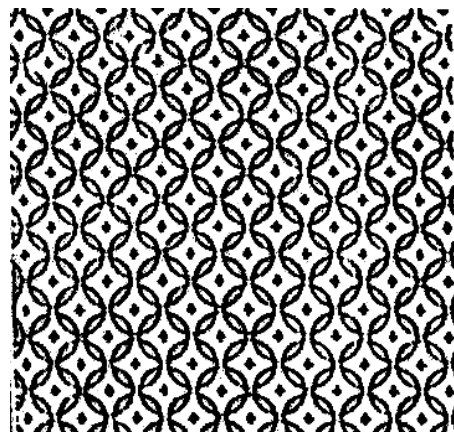


Fig.3.2 Red de círculos resultado del marcado electroquímico

Para poder medir posteriormente la deformación en la probeta ha sido necesario un proceso electroquímico de marcado del material (proceso de grillado). Para ello se ha utilizado el equipo ME96 que, además de dar el resultado deseado, es un proceso

rápido, fácil y que no introduce tensiones en el material. El resultado es una red de círculos de diámetro específico en la superficie del material como se muestra en la Fig.3.2

### 3.1.2. ENSAYOS CON DC01

#### ESTADO BIAXIAL

Para alcanzar este estado se ha necesitado una probeta de geometría cuadrada. Después de sucesivos ensayos se han obtenido, bajo las mismas condiciones, dos ensayos válidos. Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

- Dimensiones de la probeta cuadrada: 220x220x1.15 mm<sup>3</sup>
- Diámetro de los círculos de marcaje: 5mm.
- Condiciones de lubricación (secuencia de lubricación):
  - 1- Grasa (directamente en contacto con la chapa)
  - 2- Teflón
  - 3- Grasa
  - 4- PVC
  - 5- Grasa
  - 6- Teflón
  - 7- Grasa
  - 8- Goma en la máquina
- Presión inicial: 150 bar aplicados manualmente
- Velocidad del punzón: 10mm/min.

La presión inicial aplicada manualmente y la velocidad del punzón han sido variadas a lo largo de los ensayos hasta obtener las condiciones de fractura deseadas (fractura centrada). Sin embargo, mientras la velocidad del punzón se mantuvo constante a lo largo de cada ensayo, la presión inicial disminuyó en unos 30 bar aproximadamente.

En la Fig.3.3 se pueden ver los resultados de las probetas ensayadas. En las fotografías se puede ver la posición correctamente centrada de la fractura. Las líneas dibujadas en ellas han sido necesarias para delimitar la zona en la que se va a medir la deformación, este proceso será explicado posteriormente.

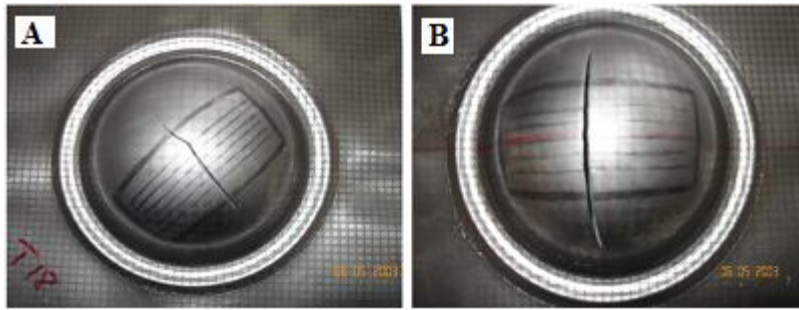


Fig.3.3 Probetas ensayadas DC01 para el estado biaxial. A) *Probeta 18 DC01*. B) *Probeta 19 DC01*.

### ESTADO DE DEFORMACIÓN PLANA

Para alcanzar este estado fue necesario probar con diferentes anchos de probeta hasta encontrar el que da lugar a este estado. Una vez encontrado el ancho deseado, tras sucesivos ensayos, se obtuvieron dos ensayos válidos. Ambos ensayos válidos fueron obtenidos bajo las mismas condiciones que fueron las que se citan a continuación:

- Dimensiones de la probeta: 220x120x1.15 mm<sup>3</sup>
- Diámetro de los círculos de marcaje: 5mm.
- Condiciones de lubricación: las mismas que en el caso anterior
- Presión inicial: 230 bar aplicados manualmente sufriendo un descenso a lo largo del ensayo hasta 210 bar (aproximadamente).
- Velocidad del punzón: 10mm/min.

En la Fig.3.4 se puede ver el resultado de los ensayos en el estado de deformación plana.

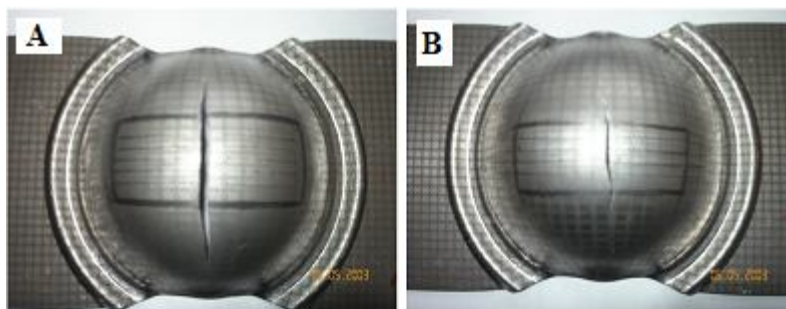


Fig.3.4 Probetas ensayadas DC01 para el estado de deformación plana. A) *Probeta 22 DC01*. B) *Probeta 23 DC01*

### 3.1.3. ENSAYOS CON DC06

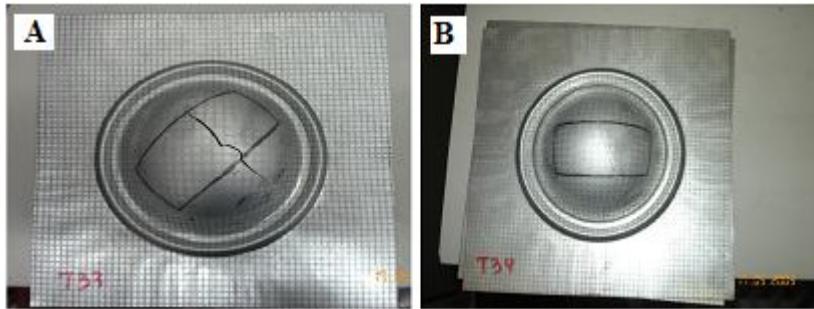
#### ESTADO BIAxIAL

Para alcanzar este estado, al igual que con el material anterior, se ha necesitado una probeta de geometría cuadrada. Después de sucesivos ensayos se han obtenido, bajo las mismas condiciones, tres ensayos válidos. Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DOME TEST

- Dimensiones: 225x225x0.85 mm<sup>3</sup>
- Diámetro de los círculos de marcaje: 5mm.
- Condiciones de lubricación: las mismas que en los casos anteriores
- Presión inicial: 140 bar aplicados manualmente sufriendo un descenso a lo largo del ensayo hasta 120 bar (aproximadamente)
- Velocidad del punzón: 10mm/min.

En la Fig.3.5 se pueden ver los resultados de las probetas ensayadas.



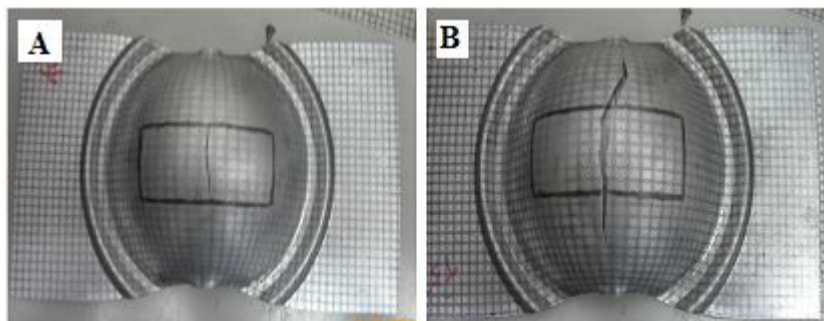
**Fig.3.5** Probetas ensayadas DC06 para el estado biaxial. A) *Probeta 33 DC06*. B) *Probeta 34 DC06*

#### ESTADO DE DEFORMACIÓN PLANA

Para alcanzar este estado fue necesario probar con diferentes anchos de probeta hasta encontrar el que da lugar a este estado. Una vez encontrado el ancho deseado, tras sucesivos ensayos, se obtuvieron dos ensayos válidos. Ambos ensayos válidos fueron obtenidos bajo las mismas condiciones que fueron las que se citan a continuación:

- Dimensiones: 225x120x0.85 mm<sup>3</sup>
- Diámetro de los círculos de marcaje: 5mm.
- Condiciones de lubricación: las mismas que en los casos anteriores.
- Presión inicial: 200 bar aplicados manualmente sufriendo un descenso a lo largo del ensayo hasta 180 bar (aproximadamente).
- Velocidad del punzón: 10mm/min.

En la Fig.3.6 se puede ver el resultado de los ensayos en el estado de deformación plana.



**Fig.3.6** Probetas ensayadas DC06 para el estado de deformación plana. A) *Probeta 36 DC06*. B) *Probeta 37 DC06*

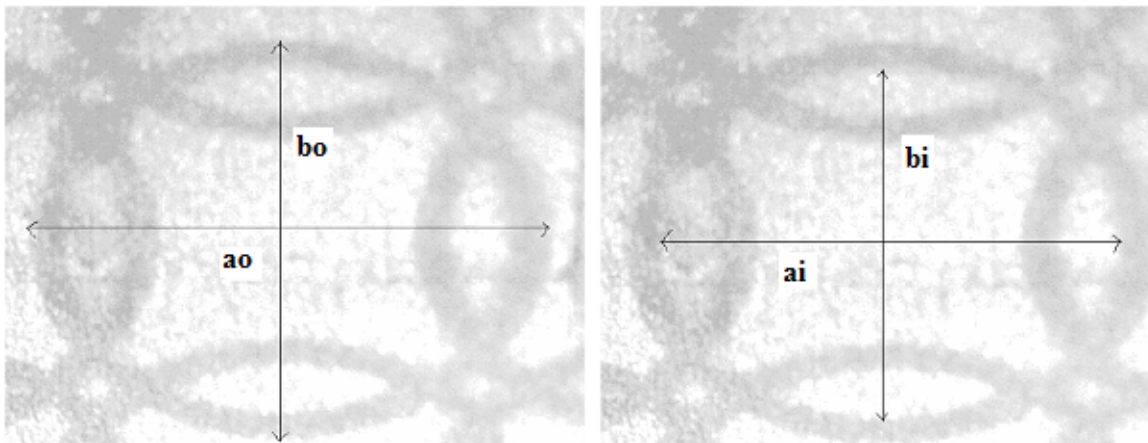


### 3.1.4. PROCESO DE MEDICIÓN

En primer lugar, para medir la deformación de las probetas tras los ensayos, se han medido las dimensiones del grillado dibujado previamente en cada plancha. Las dimensiones medidas han sido  $a_i$ ,  $a_o$ ,  $b_i$  y  $b_o$  tomando como valores finales  $a_0$  (media de  $a_i$  y  $a_o$ ) y  $b_0$  (media de  $b_i$  y  $b_o$ ). Donde:

- $a_o$ : es el diámetro exterior en la dirección de mayor deformación
- $b_o$ : es el diámetro exterior en la dirección de menor deformación
- $a_i$ : es el diámetro interior en la dirección de mayor deformación
- $b_i$ : es el diámetro interior en la dirección de menor deformación

Para una visión más clara de la diferencia entre estas dimensiones en lector puede acudir a la Fig.3.7.



**Fig.3.7. Representación esquemática de las dimensiones originales de la celda**

Estas dimensiones deberían ser las mismas puesto que se trata de un círculo, sin embargo se puede observar que no es el caso. Se ha tenido en cuenta esta diferencia ya que cada una se usa para el cálculo de la deformación en una dirección diferente, dirección de mayor deformación ( $a_0$ ) y dirección de menor deformación ( $b_0$ ).

**Tabla 3.1. Dimensiones originales de la celda (mm.)**

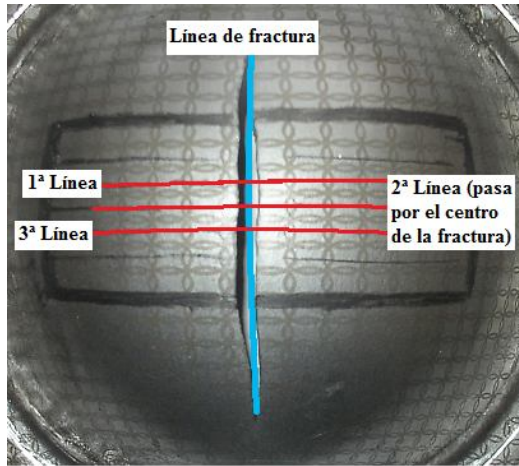
$a_0$	5068.2
$b_0$	4974.4

Estos resultados fueron medidos con la ayuda del microscopio Leica MZ8. Este microscopio utiliza el sistema Qwin para el procesado y el análisis de imágenes y permite medir la distancia entre dos puntos y el valor de un área dibujada por el usuario.

La deformación de cada una de las probetas ha sido calculada a partir de la deformación de 24 celdas. La distribución de estas 24 celdas en la probeta ha sido la siguiente (de acuerdo a la norma ISO/WD 12004:2004 E, 2004): se han marcado tres líneas de deformación perpendiculares a la fractura, donde la línea central es la que pasa aproximadamente por el centro de la fractura. Posteriormente, en cada línea se han tomado 8 celdas, de las cuales 4 quedaban a la izquierda de la fractura y 4 a la derecha.

### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DOME TEST

En la Fig.3.8 se puede ver una fotografía de las tres líneas de deformación explicadas en este párrafo para uno de los conos.



**Fig.3.8 Líneas de deformación utilizadas**

Una vez extraída la región de interés de la probeta, se ha procedido a medir las nuevas dimensiones de cada celda.

La deformación ingenieril o nominal para cada celda ha sido calculada usando las ecuaciones de deformación básicas:

$$e = \varepsilon_n = \frac{(L_{real} - L_{original})}{L_{original}} \quad (3.1)$$

Donde  $L_{original}$  tomará el valor de  $a_0$  o  $b_0$  dependiendo de la deformación ingenieril que se esté calculando (en la dirección de mayor deformación o en la dirección de menor deformación).

Por otro lado, para el cálculo de la deformación verdadera, se ha utilizado la ecuación básica que relaciona ambas deformaciones, esto es:

$$\varepsilon = \varepsilon_r = \ln(e + 1) \quad (3.2)$$

Una vez realizados estos cálculos, se obtuvo la deformación de cada una de las tres líneas de deformación por probeta. Ésta curva fue ajustada a una curva parabólica de segundo orden (ecuación 3.3) para facilitar la obtención del punto de fractura y, por tanto, el valor de mayor deformación. Las constantes de la ecuación parabólica fueron obtenidas minimizando el error existente entre la deformación obtenida en la práctica y la deformación teórica dada por el ajuste.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.3)$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son las constantes de la parábola,  $y$  es la deformación verdadera y  $x$  es la distancia desde el centro de la fractura.

Ejemplos de los cálculos realizados se podrán ver en los apartados que siguen.

## 3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 3.2.1. RESULTADOS DC01

A continuación se van a mostrar los resultados de los cálculos de la deformación de algunas de las probetas del acero DC01. Los resultados que se van a ofrecer consisten en gráficas que muestran la deformación obtenida en la práctica y la deformación obtenida mediante el ajuste explicado en el apartado anterior. Para ello, se facilita la siguiente leyenda de símbolos:

- eps\_mayor: es la deformación normal verdadera en la dirección de mayor deformación del plano de la chapa
- eps\_mayor\_parab: es la curva que resulta de esta deformación tras el ajuste
- eps\_menor: es la deformación normal verdadera en la dirección de menor deformación del plano de la chapa
- eps\_menor\_parab: es la curva que resulta de esta deformación tras el ajuste

La Fig.3.9 representa la deformación en la segunda línea de deformación (representada en la Fig.3.8) de las tres utilizadas en la probeta número 18 (estado biaxial del acero DC01). Esta gráfica muestra las deformaciones verdaderas, tanto las medidas como las ajustadas, y en ambas direcciones del plano de la chapa, la de mayor deformación y la de menor deformación. Se puede apreciar en esta gráfica cómo las deformaciones en ambas direcciones son aproximadamente las mismas y por tanto se puede afirmar que el estado biaxial fue alcanzado.

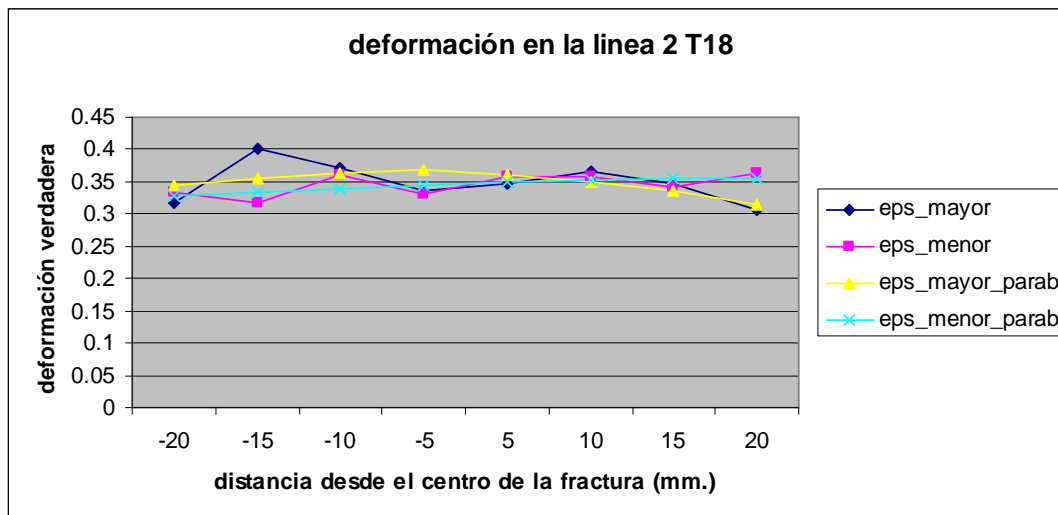


Fig.3.9. Deformación en la segunda línea de la probeta 18 (estado equibiaxial)

Para las otras dos líneas de deformación (la primera y la tercera línea representadas en la Fig.3.8) de la probeta 18 y las tres líneas de deformación de la probeta 19 se obtiene un resultado parecido y para evitar la redundancia no se muestran.

La Fig.3.10 muestra la deformación en la tercera línea de deformación de la probeta número 22. Como en el caso anterior, en esta gráfica están representadas las deformaciones verdaderas medidas y las ajustadas para ambas direcciones del plano. En este caso, y diferenciándose del anterior, se puede observar como la deformación



### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL DOME TEST

verdadera en una de las direcciones del plano es prácticamente nula debido a que, en este caso, nos encontramos en el estado de deformación plana.

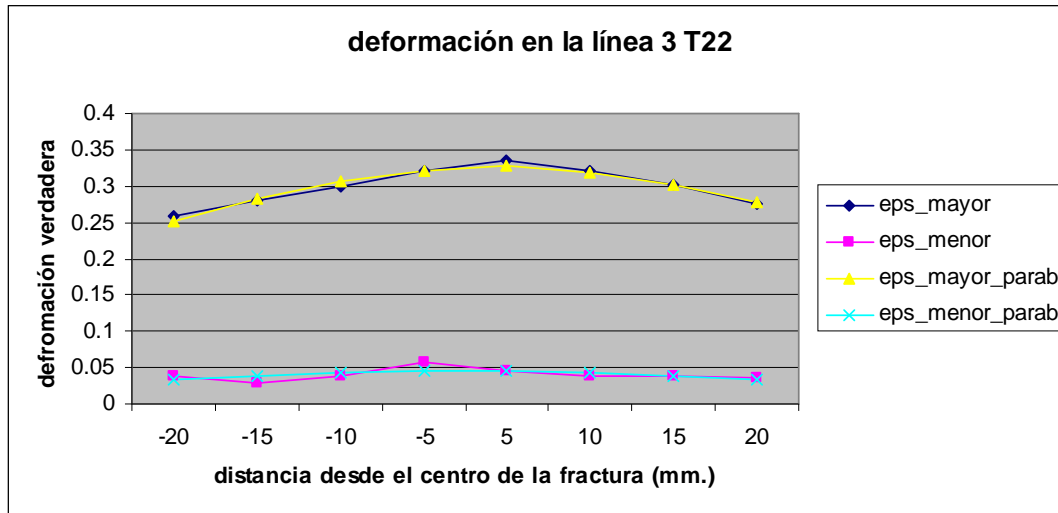


Fig.3.10. Deformación en la línea 3 de la probeta 22 (estado de deformación plana)

Una vez que se ha medido la deformación en cada una de las líneas, se puede obtener para una misma línea de deformación, gracias al ajuste parabólico realizado, el punto de máxima deformación para cada una de las dos direcciones del plano. El punto máximo de cada una de las dos direcciones del plano para una misma línea de deformación debería ser el mismo; sin embargo, se observa una ligera diferencia entre ellos que puede ser achacada a errores en la toma de datos.

Estos puntos (los dos puntos obtenidos por línea de deformación y que deberían ser coincidentes), al ser los de máxima deformación, se asume que corresponden al punto de fractura de cada línea de deformación.

Si se toman los puntos máximos de cada una de las tres líneas de cada probeta (1 punto por 3 líneas de deformación por 4 probetas dan 12 puntos en total), se puede dibujar la curva límite de conformado (FLC) para el acero DC01. La Fig.3.11 muestra el resultado de poner en el mismo diagrama estos puntos, dando lugar, por tanto, al FLC del acero DC01.

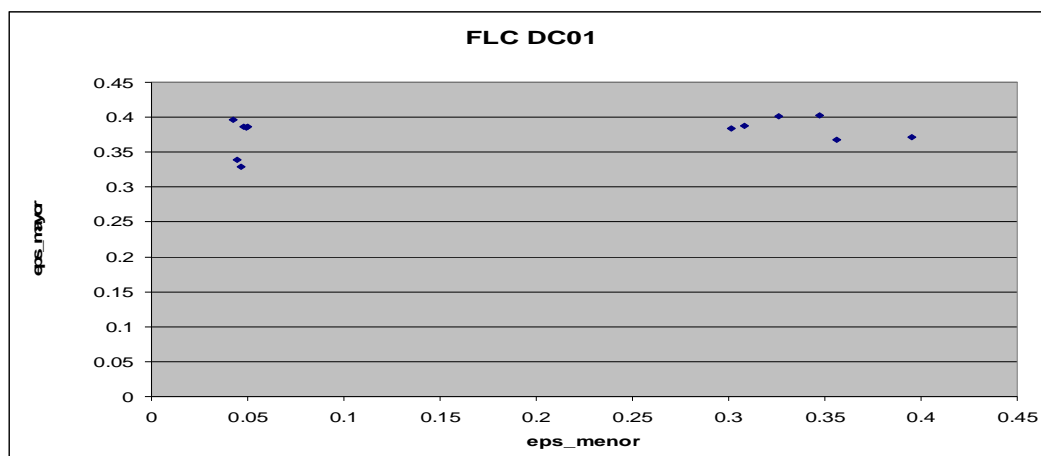


Fig.3.11. Curva de deformación límite del acero DC01

Para ver los puntos que han dado lugar a la Fig.3.11 el lector puede acudir al texto en inglés.

### 3.2.2. RESULTADOS DC06

A continuación se van a mostrar los resultados de los cálculos de la deformación de algunas de las probetas del acero DC06.

La Fig.3.12 representa la deformación en la segunda línea de deformación (ver Fig.3.8) de las tres líneas de deformación utilizadas en la probeta número 33 (estado biaxial del acero DC06). Las deformaciones en ambas direcciones son coincidentes y por tanto se puede afirmar que el estado biaxial fue alcanzado.

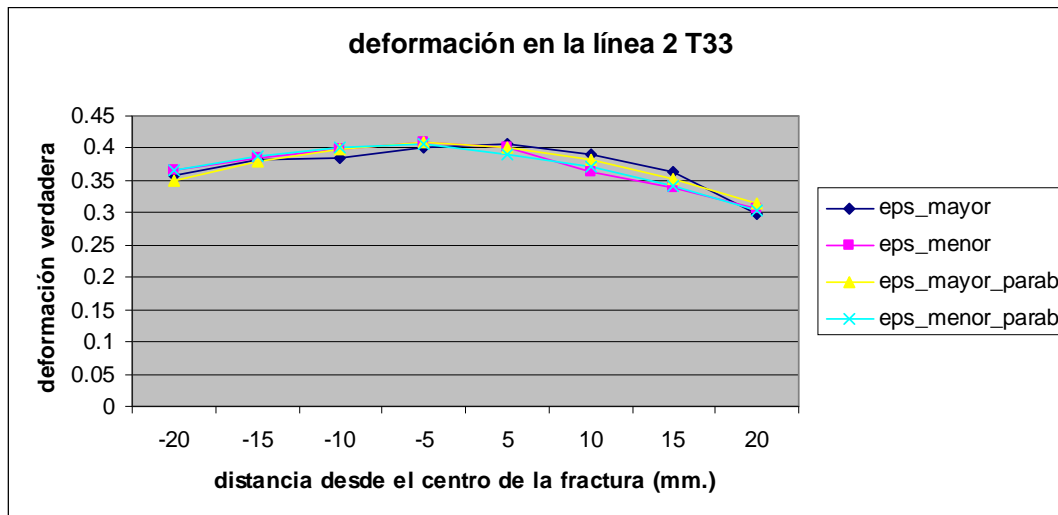


Fig.3.12. Deformación en la línea 2 de la probeta 33 (estado equibiaxial)

La Fig.3.13 muestra la deformación en la primera línea de la probeta número 37. En este caso, y diferenciándose del caso anterior, se puede observar como la deformación verdadera en una de las direcciones del plano es prácticamente nula debido a que nos encontramos en el estado de deformación plana.

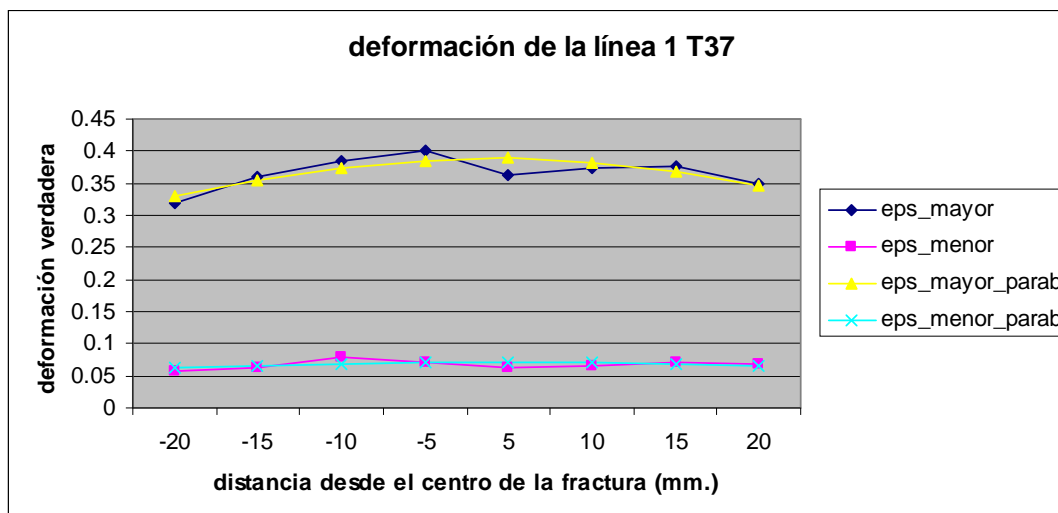
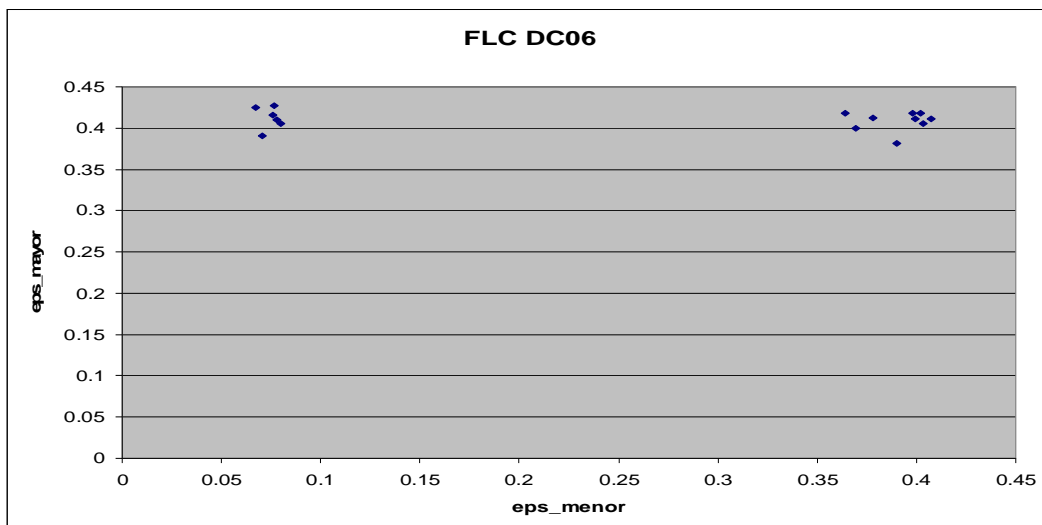


Fig.3.13. Deformación en la línea 1 de la probeta 37 (estado de deformación plana)

Análogamente al caso anterior, una vez que se ha medido la deformación en cada una de las líneas, se puede obtener para una misma línea de deformación, gracias al ajuste parabólico realizado, el punto de máxima deformación para cada una de las dos direcciones del plano. El punto máximo de cada una de las dos direcciones del plano para una misma línea de deformación debería ser el mismo; sin embargo, se observa una ligera diferencia entre ellos que puede ser achacada a errores en la toma de datos.

Estos puntos (los dos puntos obtenidos por línea de deformación y que deberían ser coincidentes), al ser los de máxima deformación, se asume que corresponden al punto de fractura de cada línea de deformación.

Si se toman los puntos máximos de cada una de las tres líneas de cada probeta (1 punto por 3 líneas de deformación por 5 probetas dan 15 puntos en total), se puede dibujar la curva límite de conformado (FLC) para el acero DC06. La Fig.3.14 muestra el resultado de poner en el mismo diagrama estos puntos, dando lugar, por tanto, al FLC del acero DC06.



**Fig.3.14. Curva de deformación límite del acero DC06**

Para ver los puntos que han dado lugar a la Fig.3.14 el lector puede encontrarlos en el texto en inglés.

## 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL. SPIF

### 4.1. REALIZACIÓN DE ENSAYOS

En un proceso SPIF (Single Point Incremental Forming) genérico se pueden hacer piezas de cualquier perfil usando únicamente una herramienta estandarizada y controlada por una máquina CNC (máquina de control numérico por computadora). El material de partida es una plancha de metal plana sujeta y montada en la mesa de la máquina CNC. Para formar el perfil deseado, la herramienta se mueve según una trayectoria programada previamente por el usuario. En la Fig.4.1 aparece una fotografía de la máquina usada para los procesos SPIF realizados en este trabajo. Se trata de la ACIERA F45 CNC-4 cuya área de trabajo es 230x230 mm<sup>2</sup>.



Fig.4.1. Máquina ACIERA F45

### 4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Todas las probetas producidas por SPIF han sido conos para simplificar las mediciones y la programación. Se han realizado distintos experimentos en función de la propiedad o característica a medir. A continuación se detallan todos los experimentos realizados al igual que los resultados obtenidos.

#### 4.2.1. MEDIDA DEL ESPESOR

La finalidad de este apartado es la obtención del perfil de espesores que hay en la pared de un cono producido por SPIF.

En primer lugar se han producido distintos conos con distinta inclinación de pared. Una vez obtenidos los conos se han extraído dos cuñas de cada uno de ellos. Las cuñas tienen una orientación específica que consiste en que un lado de una de las cuñas coincide con la dirección de laminación mientras que un lado de la otra cuña coincide con la dirección transversal (perpendicular a la dirección de laminación). En la Fig.4.2 se puede ver la fotografía de un cono del que ya se han retirado las cuñas y en la Fig.4.3 la fotografía de una cuña.



Fig.4.2. Cono con cuñas retiradas



Fig.4.3. Fotografía de una cuña

Para la medición del espesor se ha utilizado un calibrador (de 0.01mm. de precisión), habiendo previamente preparado las probetas a partir de las cuñas del siguiente modo:

1. Desbastado y pulido de los bordes de las cuñas para la eliminación de las asperezas.
2. Pegado de un trozo de papel milimetrado en el borde de la cuña objeto de estudio, es decir, del lado que coincide con la dirección de laminación o la perpendicular a ésta.

Con las probetas preparadas se ha procedido a la medición del espesor cada 2.5mm. siendo, por tanto, el papel milimetrado el que indica en qué punto había que realizar la medición del espesor

Una vez tomadas las medidas del espesor se ha hecho uso de la ley de Sine explicada en el apartado 1 (antecedentes). Como ya ha sido explicado, esta ley predice el espesor final de una pieza conformada por un proceso SPIF de acuerdo a la ecuación 4.1

$$t_f = t_i * \text{sen}(90 - \alpha) \quad (4.1)$$

Donde  $t_f$  es el espesor final de la probeta,  $t_i$  el espesor inicial y  $\alpha$  el ángulo de inclinación de la pared del cono respecto del eje vertical.

En la Fig.4.4 se puede ver una representación de la cuña, con una indicación del punto de partida y del punto final para las mediciones del espesor.

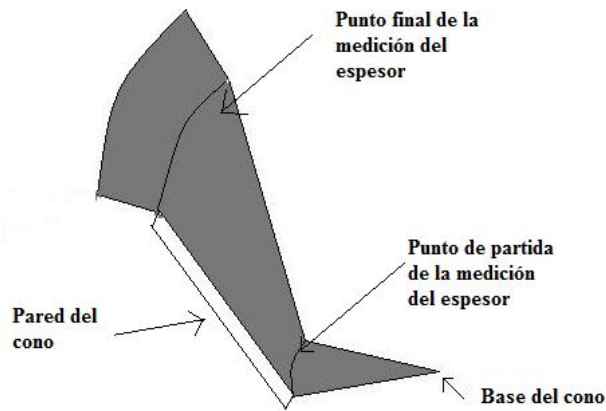


Fig.4.4. Representación de la cuña con indicaciones de las mediciones

#### 4.2.1.1. RESULTADOS DEL ALUMINIO

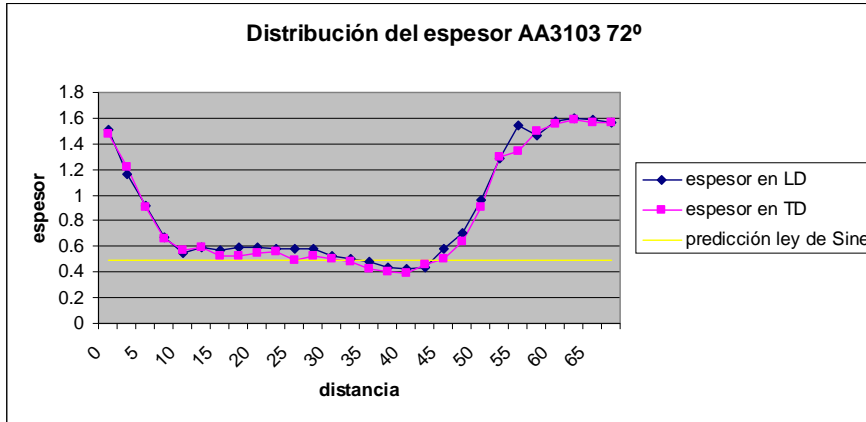
Para el caso del aluminio se ha medido el espesor de dos conos conformados bajo las mismas condiciones y con el mismo diámetro de herramienta pero con distinto ángulo de inclinación de la pared. En la Tabla 4.1 se pueden ver los parámetros de conformado para ambos conos así como el valor medio de los espesores medidos.

Tabla 4.1. Parámetros de conformado de los conos de Aluminio

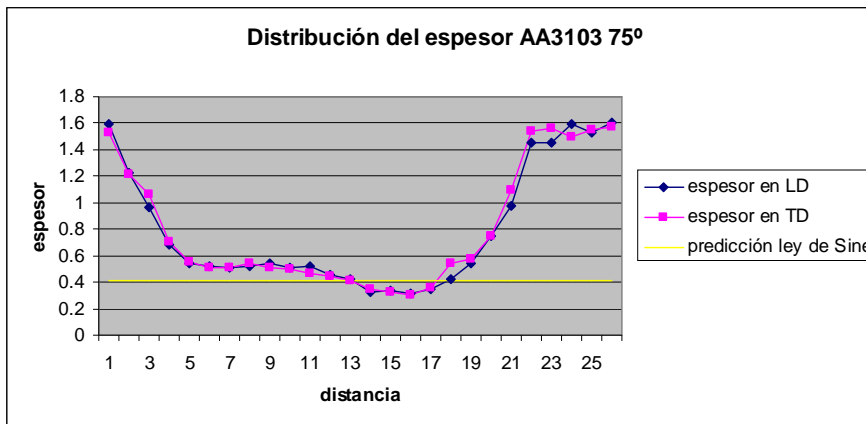
Cono	Espesor (mm)	Ángulo de inclinación (°)	Diámetro de herramienta (mm)	Espesores finales (mm)		
				Dirección de laminación	Dirección transversal	Ley de Sine
S07	1.50	72	10	0.65	0.63	0.49
S09	1.50	75	10	0.57	0.59	0.41

Estudios realizados previamente con este material por otros autores han revelado que el ángulo máximo de inclinación de pared para este tipo de aluminio es de 75° (el cono de ángulo 76° rompe), es por esta razón que no hizo falta hallar este valor. Se han elegido dos valores de ángulo próximos al límite para la medida de la distribución del espesor.

La Fig.4.5 es la representación gráfica de la distribución del espesor del cono S07 (72°) a lo largo de la pared. En esta gráfica, al igual que en la Fig.4.6 (cono S09), se observan tres líneas diferentes. La línea azul representa la distribución del espesor a lo largo de la pared del cono en la dirección de laminación (LD), mientras que la línea de color rosa representa la distribución del espesor a lo largo de la pared del cono en la dirección transversal (TD). Se marca la diferencia entre estas dos direcciones porque uno de los objetivos de este estudio es ver cómo influye en el espesor la dirección de medida. Finalmente la línea recta de color amarillo representa la predicción del espesor final según la ley de Sine.



**Fig.4.5. Distribución del espesor del cono de aluminio a un ángulo de 72°**



**Fig.4.6. Distribución del espesor del cono de aluminio a un ángulo de 75°**

Se observa que las diferencias entre las medidas del espesor realizadas en la dirección de laminación y en la dirección transversal son muy pequeñas y podrían considerarse nulas.

#### 4.2.1.2. RESULTADOS DEL DC01

Para el caso del acero DC01 se han estudiado diez conos con diferentes ángulos de inclinación de pared. Todos los conos tenían el mismo espesor inicial y han sido procesados con el mismo diámetro de herramienta. En la Tabla 4.2 aparece el desglose de los parámetros de los diez conos así como el valor medio de los espesores medidos.

Tabla 4.2. Parámetros de los conos de acero DC01

Cono	Ángulo de inclinación de pared (°)	Espesor (mm)	Diámetro de herramienta (mm)	Espesores finales (mm)		
				Dirección de laminación	Dirección transversal	Ley de Sine
Cono 10	10	1.15	10	1.07	1.10	1.13
Cono 11	20	1.15	10	1.02	1.02	1.08
Cono 12	30	1.15	10	0.95	0.96	1.00
Cono 13	40	1.15	10	0.85	0.87	0.88
Cono 14	50	1.15	10	0.70	0.71	0.74
Cono 15	55	1.15	10	0.63	0.63	0.66
Cono 16	60	1.15	10	0.56	0.60	0.58
Cono 17	65	1.15	10	0.48	0.47	0.49
Cono 18	66	1.15	10	0.49	0.44	0.47
Cono 19	67	1.15	10	0.44	0.45	0.45

Los estudios realizados, tanto a lo largo de este proyecto como los realizados previamente, han revelado que el ángulo límite de inclinación de pared para el acero DC01 es de 67° ya que el siguiente cono (de ángulo 68°) presenta fractura.

La Fig.4.7 representa la distribución del espesor a lo largo de la pared de dos conos, el cono de ángulo 20° y el cono de ángulo 67°. Para cada uno de los conos aparece la distribución en las dos direcciones interesantes (la dirección de laminación y la dirección transversal) y la predicción de Sine.

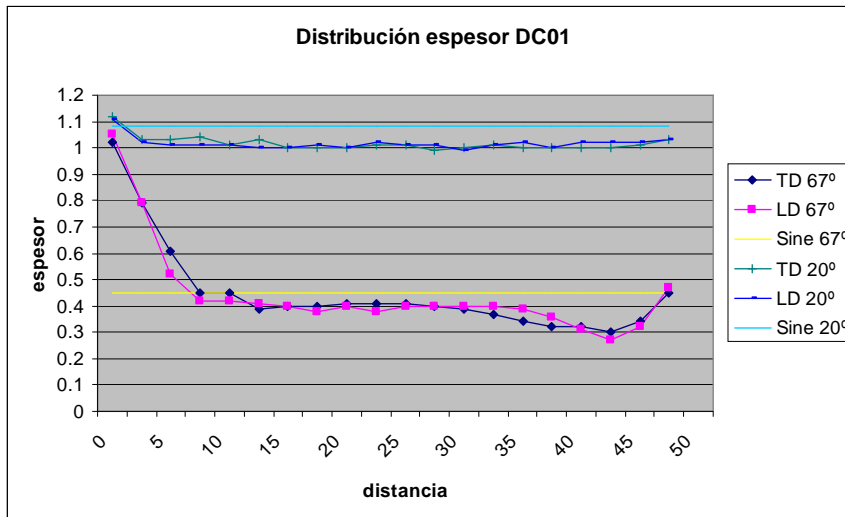


Fig.4.7. Distribución del espesor para DC01 y ángulos de 67° y 20°

Se observa que las diferencias entre las medidas del espesor realizadas en la dirección de laminación y en la dirección transversal son muy pequeñas y podrían considerarse nulas para el mismo ángulo de inclinación de pared.



#### 4.2.1.3. RESULTADOS DEL DC06

Para el caso DC06 se han estudiado 10 conos con diferentes ángulos de inclinación de pared. Todos los conos tenían el mismo espesor inicial y han sido procesados con el mismo diámetro de herramienta. En este caso, el ángulo límite de inclinación de pared era desconocido y fue necesario su hallazgo. Puesto que se trata de un acero con propiedades similares al DC01 se ha pensado en un principio que el ángulo límite sería el mismo. Por esta razón, se han tomado los mismos ángulos que en el caso anterior (DC01). Sin embargo, tras realizar todos los ensayos se ha visto que el cono de ángulo 67° aparecía fracturado y como consecuencia se ha tomado como ángulo límite de inclinación de pared 66°.

En la Tabla 4.3 aparece el desglose de los parámetros de los diez conos de acero DC06, así como el valor medio de los espesores medidos.

Tabla 4.3. Parámetros de los conos de acero DC06

Cono	Ángulo de inclinación de pared (°)	Espesor (mm)	Diámetro de herramienta (mm)	Espesores finales (mm)		
				Dirección de laminación	Dirección transversal	Ley de Sine
Cono 20	10	0.85	10	0.69	0.71	0.84
Cono 21	20	0.85	10	0.68	0.67	0.80
Cono 22	30	0.85	10	0.61	0.60	0.74
Cono 23	40	0.85	10	0.54	0.55	0.65
Cono 24	50	0.85	10	0.48	0.47	0.55
Cono 25	55	0.85	10	0.40	0.41	0.49
Cono 26	60	0.85	10	0.37	0.37	0.43
Cono 27	65	0.85	10	0.29	0.29	0.36
Cono 28	66	0.85	10	0.28	0.28	0.35
Cono 29	67 (fracturado)	0.85	10	0.26	0.27	0.33

La Fig.4.8 representa la distribución del espesor a lo largo de la pared de dos conos, el cono de ángulo 10° y el cono de ángulo 66°. Para cada uno de los conos aparece la distribución en las dos direcciones interesantes (la dirección de laminación y la dirección transversal) y la predicción de Sine.

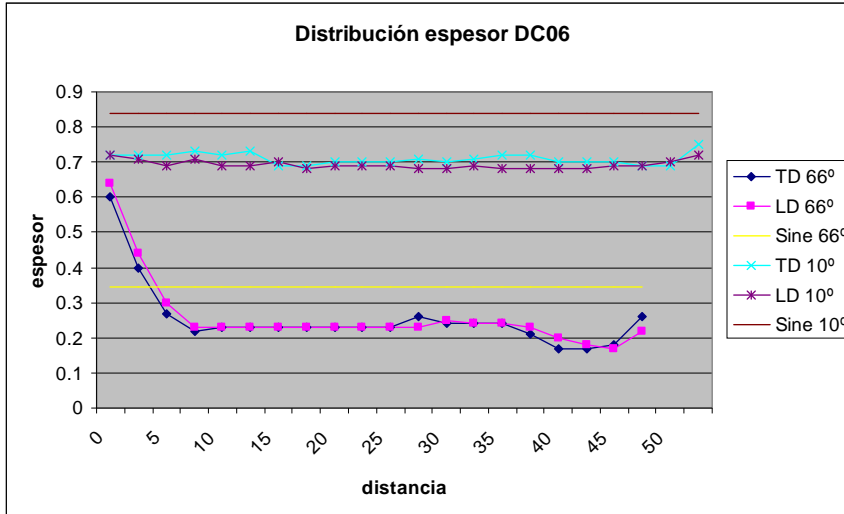


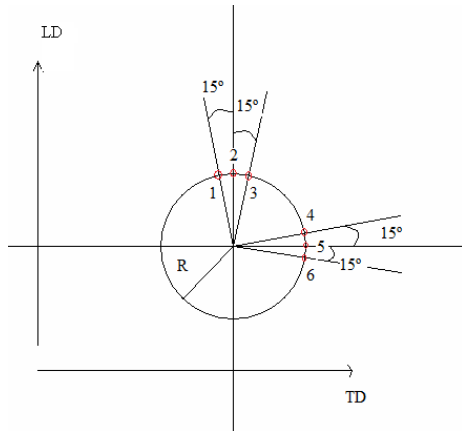
Fig.4.8. Distribución del espesor para DC06 y ángulos de 66° y 10°

Se observa que las diferencias entre las medidas del espesor realizadas en la dirección de laminación y en la dirección transversal son muy pequeñas y podrían considerarse nulas para el mismo ángulo de inclinación de pared. Por otro lado, también se observa como la diferencia que hay entre los valores medios del espesor medido y el valor del espesor predicho es más grande que en los casos anteriores.

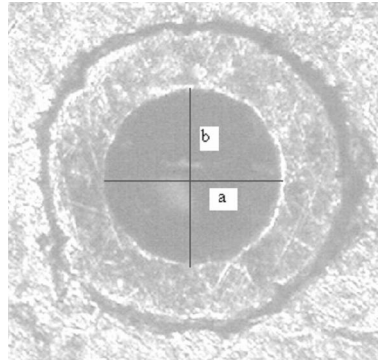
#### 4.2.2. ÁNGULO DE DEFORMACIÓN TANGENCIAL

En este apartado se pretende, en primer lugar, corroborar la existencia de deformación tangencial en los procesos de conformado incremental obteniendo los ángulos de deformación tangencial.

De la misma manera, se pretende resumir el estudio sobre la influencia que tienen los distintos parámetros de conformado (ángulo de inclinación de pared, espesor de la chapa y diámetro de herramienta) en el ángulo de deformación tangencial. Para posibilitar este análisis, antes del procesado de los conos se perforaron seis pequeños agujeros de diámetro 0.4mm en las chapas de la forma en que se indica en la Fig.4.9, de manera que tres de ellos queden en la dirección de laminación (LD) y los otros tres en la dirección transversal (TD). La fotografía de uno de los agujeros puede verse en la Fig.4.10 así como las dimensiones tomadas para los cálculos posteriores de la deformación. Este método de los agujeros perforados es completamente innovador y ha sido precisamente desarrollado para la realización de este trabajo.



**Fig.4.9. Posición de las perforaciones**

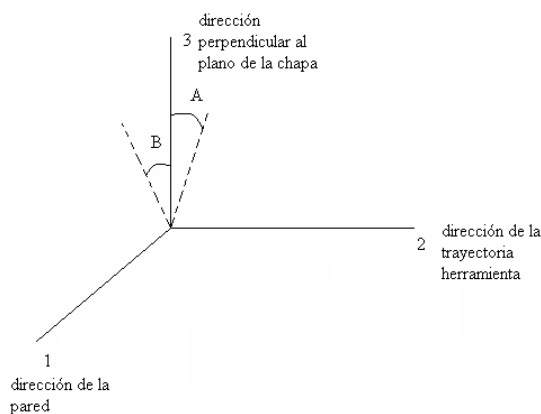


**Fig.4.10. Fotografía de un agujero perforado (a es el eje horizontal y b el vertical)**

Tras el procesado de los conos, ha sido posible, con ayuda del microscopio Leica MZ8 y del goniómetro, medir la deformación y la inclinación de estos agujeros. Mirando a través de los agujeros se ha procedido a medir dos ángulos distintos que se representan en la Fig.4.11.

Ángulo A: ángulo formado entre la dirección perpendicular al plano de la chapa (eje z en coordenadas cilíndricas) y la dirección de la trayectoria de la herramienta (coordenada  $\theta$  en coordenadas cilíndricas).

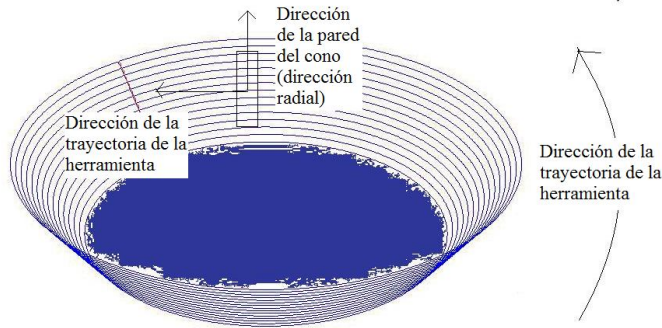
Ángulo B: ángulo formado entre la dirección perpendicular al plano de la chapa (eje z en coordenadas cilíndricas) y la dirección radial (dirección de la pared del cono y coordenada  $\rho$  en cilíndricas ).



**Fig.4.11. Esquematización de los ángulos A y B**

Una vez conformados los conos se han cortado los seis trozos rectangulares que contienen a cada uno de los agujeros perforados.

En la Fig.4.12 aparece una representación de un cono de trabajo con una indicación de la dirección de la trayectoria de la herramienta así como una representación del trozo rectangular retirado.



**Fig.4.12. Representación de un cono con la dirección de trabajo**

Se ha procedido a medir el ángulo A, el ángulo B, la deformación y el incremento de volumen de cada uno de los agujeros. La medida de estos dos últimos fue necesaria para ver si el método aplicado concordaba con el comportamiento del material o, en caso contrario, los agujeros estaban actuando como concentradores de tensión provocando variaciones en las propiedades del material. De esta forma, cuando la diferencia de volumen del agujero antes y después del procesado no es muy grande, y los valores de deformación concuerdan con los valores obtenidos por otro método más fiable, se puede afirmar que el agujero en sí no produce cambios en el comportamiento del material.

Los cálculos realizados se describen a continuación:

En primer lugar, con ayuda del microscopio Leica MZ8 se obtuvo el valor de la superficie del agujero en ambos lados (en la cara interior, es decir, la que está en contacto con la herramienta y la cara exterior del cono). Ésta superficie ha sido medida de dos formas distintas:

La primera consiste en considerar el agujero deformado como una elipse y calcular su área midiendo el diámetro mayor y el diámetro menor de la elipse y usando la fórmula matemática del área de la elipse:

$$A = \frac{\pi * a * b}{4} \quad (4.2)$$

Donde a es el diámetro mayor de la elipse y b el diámetro menor.

Éste área se calcula para ambas caras del cono (cara exterior y cara interior), obteniéndose por tanto, dos áreas, A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> siendo:

a<sub>1</sub>: distancia del diámetro mayor de la elipse en la superficie externa del cono

b<sub>1</sub>: distancia del diámetro menor de la elipse en la superficie externa del cono

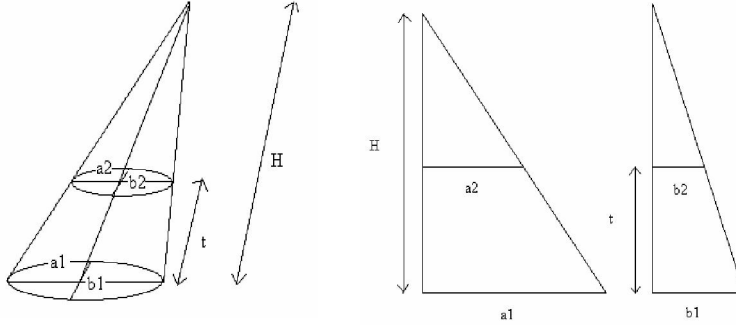
a<sub>2</sub>: distancia del diámetro mayor de la elipse en la superficie interior del cono

b<sub>2</sub>: distancia del diámetro menor de la elipse en la superficie interior del cono

La segunda forma de medir el área del agujero de cada una de las caras del cono ha sido directamente con el microscopio, dibujando el área en la imagen.

Una comparación de las áreas obtenidas por ambos métodos ha establecido un ratio entre ellas de aproximadamente 1. Por tanto, se asume que cualquiera de los dos métodos es bueno para medir el volumen del agujero.

Una vez obtenida el área del agujero en ambas caras del cono se ha procedido a medir el volumen del modo que se describe a continuación. Para ello, se muestra también una representación de los cálculos realizados para una mayor claridad, en la Fig.4.13.



**Fig.4.13. Representación de los cálculos para el volumen del agujero**

$$V_1 = \frac{1}{3} * H * A_1 \quad (4.3)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} * (H - t) * A_2 \quad (4.4)$$

$$V = V_1 - V_2 \quad (4.5)$$

Donde  $V_1$  es el volumen del cono grande,  $V_2$  el volumen del cono pequeño,  $t$  es el espesor de la pieza rectangular cortada y  $H$  es la altura del cilindro.

Para la obtención de  $H$  (altura del cilindro que representa el volumen del agujero) los cálculos realizados derivados de las ecuaciones anteriores han sido:

$$H = \frac{\frac{a_1 * t}{a_2}}{\frac{a_1}{a_2} - 1} \quad \text{o bien} \quad H = \frac{\frac{b_1 * t}{b_2}}{\frac{b_1}{b_2} - 1} \quad (4.6)$$

Para las medidas de las deformaciones de los agujeros los cálculos realizados han sido:

$$\text{- Deformación ingenieril: } e = \varepsilon_n = \frac{a_{medida} - a_{original}}{a_{original}} \quad (4.7)$$

$$\text{- Deformación verdadera: } \varepsilon = \varepsilon_r = \ln(e + 1) \quad (4.8)$$

Para cada agujero y cada cara del cono se han obtenido dos deformaciones puesto que las medidas se han hecho para dos direcciones distintas (dirección de la trayectoria de la herramienta y dirección radial). Para la obtención de la deformación en la tercera dirección que define la pieza (dirección del espesor de la pieza) se ha utilizado el principio de conservación de volumen:

$$V_{final} = V_{original} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{trayectoria} + \varepsilon_{radial} = -\varepsilon_{espesor} \quad (4.11)$$

#### 4.2.2.1. RESULTADOS DEL ALUMINIO

Los parámetros de conformado de los conos de aluminio se detallan en la Tabla 4.4

Tabla 4.4. Parámetros de conformado de los conos de aluminio

Cono	Espesor (mm)	Ángulo de inclinación (°)	Diámetro de herramienta (mm)
1	1.15	20	10
2	1.15	60	10
3	1.15	20	25
4	1.15	60	25
5	1.50	20	10
6	1.50	60	10
7	1.50	20	25
8	1.50	60	25
9	1.50	50	10

En la Tabla 4.5 aparecen los resultados de los cálculos de la deformación y del incremento de volumen.

Tabla 4.5. Resultados de los cálculos de deformación e incremento de volumen para el aluminio

Cono	Incremento de volumen	Superficie exterior				Superficie interior			
		$\varepsilon_{trayect}$	$\varepsilon_{radial}$	$\varepsilon_{espesor}$	$\varepsilon_{Sine}$	$\varepsilon_{trayect}$	$\varepsilon_{radial}$	$\varepsilon_{espesor}$	$\varepsilon_{Sine}$
1	-5.71%	0.35	0.16	-0.51	-0.06	-0.25	-0.44	0.69	-0.06
2	277.22%	1.61	0.43	-2.05	-0.69	1.54	0.36	-1.90	-0.69
3	2.50%	0.21	0.12	-0.34	-0.06	-0.08	-0.17	0.24	-0.06
4	476.29%	1.06	0.40	-1.47	-0.69	1.09	0.56	-1.65	-0.69
5	-46.85%	0.15	-0.15	0.00	-0.06	-0.64	-0.79	1.43	-0.06
6	321.11%	1.56	0.18	-1.74	-0.69	1.50	-0.01	-1.49	-0.69
7	-7.62%	0.27	0.12	-0.39	-0.06	-0.17	-0.30	0.47	-0.06
8	1176.75%	2.24	1.14	-3.39	-0.69	2.34	1.26	-3.60	-0.69
9	49.28%	1.23	0.21	-1.45	-0.44	0.28	-0.76	0.48	-0.44

Donde  $\varepsilon_{Sine}$  es el espesor que se obtiene al aplicar la ley de Sine y el incremento de volumen es la variación de volumen que sufre el agujero en relación al volumen original.

De los resultados expuestos en la Tabla 4.5 se puede decir que cuando el ángulo de inclinación de la pared del cono es pequeño (como en el caso de 20°) el volumen del agujero permanece aproximadamente constante. Sin embargo, cuando este ángulo se hace más grande (como en el caso de 60°) el incremento de volumen es mucho más grande y ya no se puede afirmar que el comportamiento del material no se ve afectado por el agujero.

#### 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL SPIF

Por otro lado, si se analizan los resultados de deformación, se puede ver que la deformación obtenida por este método es siempre mayor que la que resulta de la aplicación de la ley de Sine, y que esta diferencia aumenta de manera considerable conforme aumenta el ángulo de inclinación de la pared del cono.

Teniendo en cuenta estas dos observaciones, se puede descartar el uso de este método para el cálculo de las deformaciones a grandes ángulos de inclinación de pared. Sin embargo, cuando se trata de ángulos pequeños no se descarta del todo y las deformaciones calculadas pueden ser tomadas como una aproximación.

A continuación se va a analizar por separado la influencia de los distintos parámetros de conformado en el ángulo de deformación tangencial.

En la Tabla 4.6 se muestra la influencia del ángulo de inclinación.

**Tabla 4.6 Influencia del ángulo de inclinación de pared en el ángulo de deformación tangencial AA3103**

Ángulo de inclinación	Cono	Diámetro herramienta (mm)	Espesor (mm)	Dirección de laminación		Dirección transversal	
				Ángulo A	Ángulo B	Ángulo A	Ángulo B
20°	1	10	1.15	6°	-6°50'	7°	-5°50'
	3	25	1.15	4°	8°	4°20'	-6°
	5	10	1.50	-1°50'	1°40'	30'	2°40'
	7	25	1.50	-2° 30'	1° 10'	-2°	20'
60°	2	10	1.15	11°20'	9°10'	11°40'	-1°50'
	4	25	1.15	7°30'	3°30'	4°	3°20'
	6	10	1.50	19°10'	7°10'	20°30'	13°10'
	8	25	1.50	7°30'	-8° 50'	6°	-12°

En la Tabla 4.6 se puede ver de forma clara cómo aumenta el ángulo de deformación tangencial conforme aumenta el ángulo de inclinación de pared. Esta tendencia queda constatada al comparar dos conos de distinto ángulo de inclinación de pared pero de mismo espesor inicial y mismo diámetro de herramienta (por ejemplo conos 1 y 2). No obstante, aun existiendo esta tendencia, la obtención de una correlación matemática entre ambos no resulta evidente.

Con respecto a la influencia del espesor inicial, aunque se ve una diferencia entre los valores del ángulo de deformación tangencial dependiendo del espesor inicial, la relación entre ambos no resulta fácil de ver y parece aleatoria. Esto hace pensar que posiblemente la dependencia entre ambos sea función, a su vez, del ángulo de inclinación de pared y que el espesor inicial no es un parámetro determinante en el ángulo de deformación tangencial sino secundario.

Con respecto a la influencia del diámetro de herramienta, al igual que en el anterior, se constata que la influencia también va a depender del ángulo de inclinación de pared. Cuando el ángulo de inclinación de pared es pequeño (20°) parece que no hay variación entre conos conformados con distinto diámetro de herramienta (conos 5 y 7). Sin embargo, conforme aumenta éste ángulo parece que la influencia del diámetro de herramienta se hace mas evidente (conos 2 y 4).

Todos los valores del ángulo de deformación tangencial recogidos en las tablas anteriores son los valores promedio obtenidos tras tres mediciones por ángulo, dando lugar a una desviación que varía entre 1 y 3, lo cual indica la existencia de cierta repetitividad. Se puede acudir a los apéndices del texto en inglés para ver las mediciones con mayor detalle.

#### 4.2.2.2. RESULTADOS DEL DC01.

Los parámetro de conformado de los conos de acero DC01 se recogen en la Tabla 4.2. (pág. 24).

Para este material sólo se ha estudiado la influencia del ángulo de inclinación de pared puesto que ya se constató en el estudio del aluminio (apartado anterior) que éste era el parámetro más determinante. En la Tabla 4.7 se recogen los resultados del estudio de esta dependencia.

**Tabla 4.7. Influencia del ángulo de inclinación en el ángulo de deformación tangencial para el DC01**

Cono	Ángulo de inclinación	Dirección de laminación		Dirección transversal	
		Ángulo A	Ángulo B	Ángulo A	Ángulo B
<b>Cono 10</b>	10°	-10'	-9° 40'	-2° 20'	-12° 30'
<b>Cono 11</b>	20°	-4° 50'	-9° 10'	-9° 20'	-10° 20'
<b>Cono 12</b>	30°	-6°	2° 40'	-8° 50'	1° 20'
<b>Cono 13</b>	40°	12° 30'	1°	7° 40'	2°
<b>Cono 14</b>	50°	11° 20'	10° 10'	14°	8° 30'
<b>Cono 15</b>	55°	10° 10'	16° 30'	10° 10'	14° 40'
<b>Cono 16</b>	60°	9° 40'	20°	14° 20'	22°
<b>Cono 17</b>	65°	11° 40'	27°	12° 20'	26° 10'
<b>Cono 18</b>	66°	11° 50'	27° 30'	11° 50'	27° 10'
<b>Cono 19</b>	67°	12° 30'	19° 30'	12° 20'	18° 10'

Como en el caso anterior, los resultados recogidos en la Tabla 4.7 son los promedios de las mediciones realizadas. Como observación cabe resaltar que, a medida que aumenta el ángulo de inclinación de pared, la desviación de las mediciones disminuye debido a que resulta más fácil ver a través del agujero con el microscopio.

Para este material también se ha medido la deformación y el incremento de volumen de los agujeros. Los resultados se muestran en la Tabla 4.8.



#### 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL SPIF

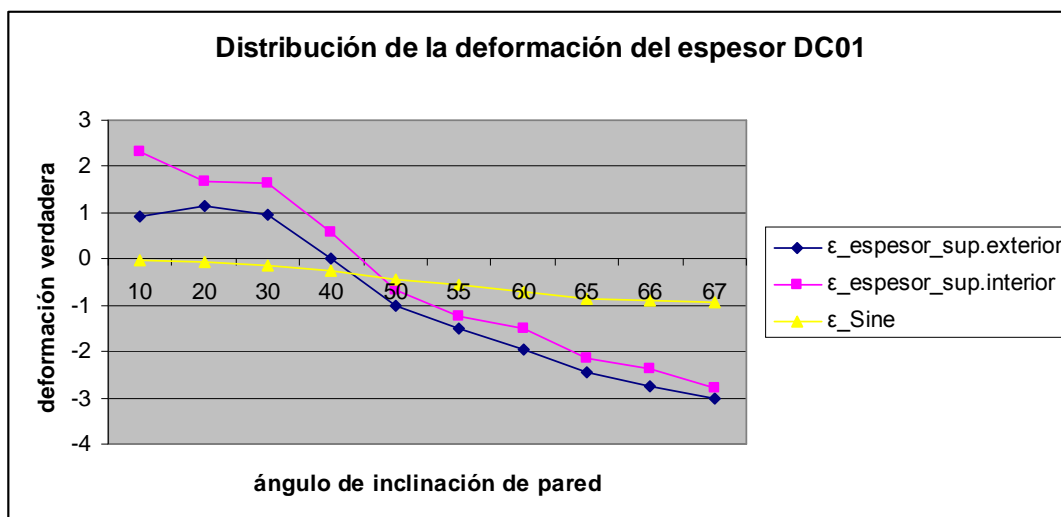
**Tabla 4.8. Resultados de los cálculos de deformación e incremento de volumen para el DC01**

Cono	Incremento de volumen	Superficie exterior				Superficie interior			
		$\epsilon_{trayect}$	$\epsilon_{radia}$	$\epsilon_{espesor}$	$\epsilon_{Sine}$	$\epsilon_{trayect}$	$\epsilon_{radial}$	$\epsilon_{espesor}$	$\epsilon_{Sine}$
10	-78.31%	-0.43	-0.48	0.91	-0.02	-1.15	-1.16	2.31	-0.02
11	-74.62%	-0.51	-0.64	1.15	-0.06	-0.88	-0.80	1.68	-0.06
12	-76.60%	-0.31	-0.66	0.97	-0.14	-0.76	-0.88	1.64	-0.14
13	19.95%	0.23	-0.25	0.02	-0.27	-0.21	-0.35	0.56	-0.27
14	77.67%	0.94	0.06	-1	-0.44	0.77	-0.10	-0.67	-0.44
15	146.67%	1.18	0.31	-1.49	-0.56	1.11	0.11	-1.22	-0.56
16	131.22%	1.42	0.53	-1.95	-0.69	1.19	0.32	-1.51	-0.69
17	215.38%	1.71	0.73	-2.43	-0.86	1.56	0.59	-2.15	-0.86
18	317.50%	1.83	0.92	-2.75	-0.90	1.68	0.70	-2.38	-0.90
19	426.16%	2.04	0.96	-3.00	-0.94	1.98	0.81	-2.79	-0.94

En los resultados de la Tabla 4.8 se observa que, a partir de un ángulo de inclinación de pared de  $55^\circ$  (cono 15), el incremento de volumen se duplica; lo que hace pensar que el agujero empieza a actuar como concentrador de tensiones y, por tanto, éste método deja de ser válido para el cálculo de las deformaciones.

Por otro lado, en cuanto a los valores de deformación, se observa que los resultados medidos y los predichos por Sine son muy parecidos, aunque siguen siendo menores los predichos. Esta diferencia también se ha constatado en el caso de aluminio y es debida a que la ley de Sine no tiene en cuenta las propiedades del material ya que solo depende del ángulo de inclinación de pared y del espesor inicial.

En la Fig.4.14 se muestra la distribución de deformaciones para los distintos ángulos de inclinación de pared. Se observa que la forma de las curvas en la superficie exterior e interior del cono son similares a la predicha y que la diferencia la marca la pendiente de la curva, siendo la de menor valor la pendiente de la curva predicha.



**Fig.4.14. Distribución de la deformación del espesor según ángulo de inclinación de la pared DC01**

#### 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL SPIF

En relación al ángulo de deformación tangencial se observa la gran influencia que ejerce sobre este ángulo el ángulo de inclinación de pared del cono. Esto demuestra que la deformación tangencial se hace más significativa y alcanza mayores valores cuanto mayor sea el ángulo de inclinación de pared.

## 5. ESTUDIO MICROESTRUCTURAL

### 5.1. MÉTODO

En este último apartado del proceso experimental se ha procedido al análisis microestructural de las piezas de ambos aceros conformadas tanto en el Dome Test como en el proceso SPIF.

Para ello se han utilizado dos microscopios diferentes (si el lector desea mas información sobre estos microscopios se le recomienda acudir al documento en inglés):

- LOM (Light Optical Microscope o microscopio óptico)
- SEM (Scanning Electron Microscope o microscopio electrónico)

Para este estudio, como para cualquier otro estudio microestructural, se ha procedido del siguiente modo:

- Corte de las piezas a analizar teniendo en cuenta cuál o cuáles son las direcciones de interés.

- Embutición las piezas en resina

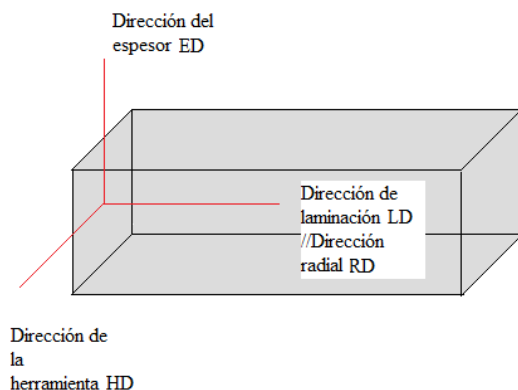
- Desbaste de las probetas

- Pulido de las probetas

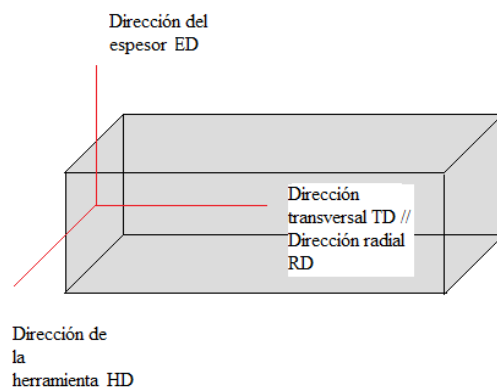
- Ataque de las probetas con pycral.

- Para el análisis microestructural de las probetas en SEM fue necesario recubrirlas de una capa de carbono para hacerlas conductoras (el lector puede encontrar una descripción mas completa del procedimiento en el documento escrito en inglés).

Para una mayor claridad de las direcciones y posiciones de las probetas que se han analizado microestructuralmente se facilitan la Fig.5.1 y la Fig.5.2. teniendo en cuenta que las caras que han sido estudiadas microscópicamente han sido las frontales y las laterales.



**Fig.5.1. Probeta en la dirección de laminación**

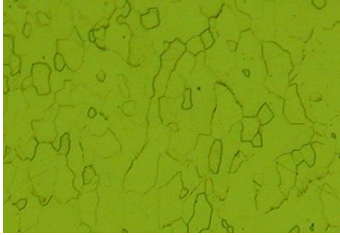


**Fig.5.2. Probeta en la dirección transversal**

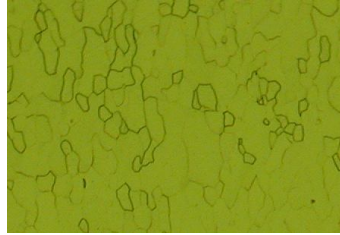
## 5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.2.1. RESULTADOS DEL DC01

Las figuras que se muestran a continuación (Fig.5.3 a la Fig.5.8) corresponden a los conos conformados por SPIF del acero DC01. En todas ellas, el eje vertical coincide con la dirección de laminación (LD) y a su vez con la dirección de la pared del cono (dirección radial, RD), el eje horizontal con el espesor y han sido obtenidas con el LOM bajo el mismo número de aumentos. Cada una de las fotografías corresponde a una probeta distinta, que procede de un cono conformado con un determinado ángulo de inclinación de pared.



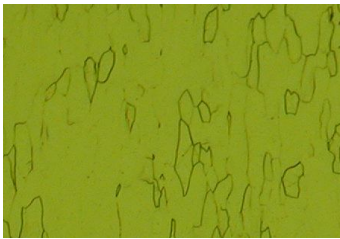
**Fig.5.3. DC01 10° LD y RD coinciden con el eje vertical**



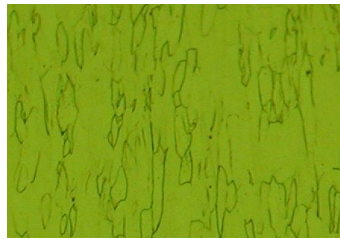
**Fig.5.4. DC01 20° LD y RD coinciden con el eje vertical**



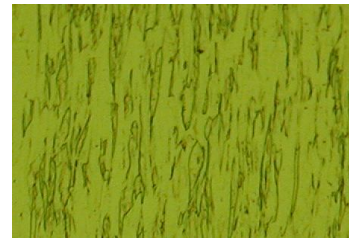
**Fig.5.5. DC01 30° LD y RD coinciden con el eje vertical**



**Fig.5.6. DC01 40° LD y RD coinciden con el eje vertical**



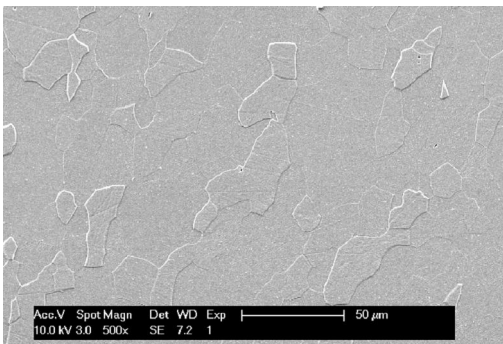
**Fig.5.7. DC01 50° LD y RD coinciden con el eje vertical**



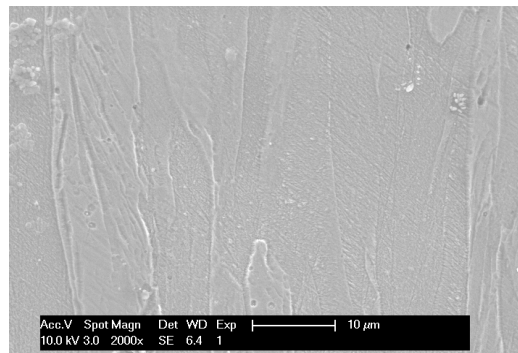
**Fig.5.8. DC01 66° LD y RD coinciden con el eje vertical**

Como era de esperar, se ha visto en las fotografías mostradas que, conforme aumenta el ángulo de inclinación de pared, aumenta la deformación de los granos en sentido de la dirección de la pared del cono (dirección radial).

La Fig.5.9 muestra la probeta de acero DC01 con un ángulo de inclinación de 20° con el microscopio SEM. De la misma manera, la Fig.5.10 muestra la probeta de acero DC01 con un ángulo de inclinación de 67°. En ambas fotografías el eje vertical coincide con la dirección de laminación (LD) y la dirección radial del cono (RD).



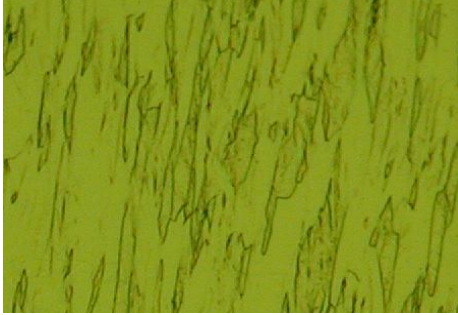
**Fig.5.9. DC01 20° LD y RD coinciden con el eje vertical y el espesor con el horizontal**



**Fig.5.10. DC01 67° LD y RD coinciden con el eje vertical y el espesor con el horizontal**

## 5. ESTUDIO MICROESTRUCTURAL

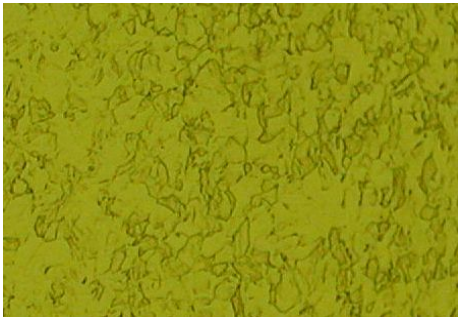
Las siguientes cuatro fotografías (Fig.5.11 a Fig.5.14) pertenecen a la probeta DC01 con un ángulo de inclinación de pared de 60°. En ellas se compara y analiza la distribución de los granos en todas las direcciones posibles (esquematzadas en las Fig.5.1 y Fig.5.2). La Fig.5.11 y la Fig.5.12 serían dos caras frontales y la Fig.5.13. y la Fig.5.14. serían dos caras laterales.



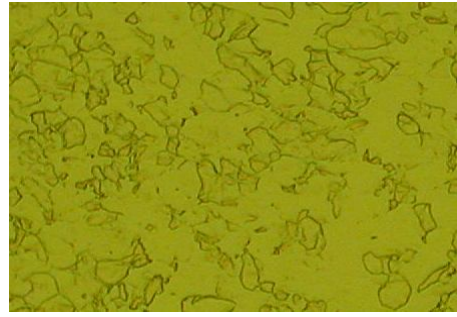
**Fig.5.11. DC01 60° LD y RD coinciden con el eje vertical y el espesor con el horizontal**



**Fig.5.12. DC01 60° TD y RD coinciden con el eje vertical y el espesor con el horizontal**



**Fig.5.13. DC01 60° TD y HD coinciden con el eje horizontal y ED coincide con el eje vertical**

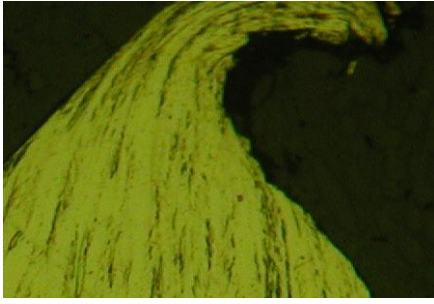


**Fig.5.14. DC01 60° LD y HD coinciden con el eje horizontal y ED coincide con el eje vertical**

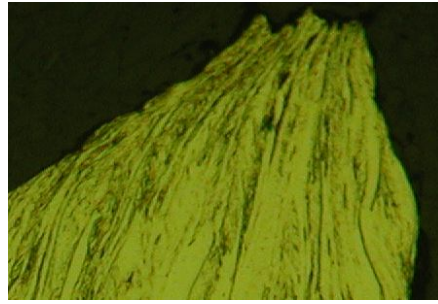
Se ha mostrado como, cuando la fotografía es tomada en la dirección de la herramienta (HD), la distribución de la forma de los granos es completamente distinta, puesto que en este caso, los granos aparecen deformados en dos direcciones en lugar de en una (Fig.5.13 y Fig.5.14) correspondiendo al estado de deformación plana. También se ha realizado una comparación entre la forma de los granos de una probeta en la dirección de laminación y una probeta en la dirección transversal sin observar ninguna diferencia entre ambas. Por lo tanto, después de un proceso SPIF, la dirección de laminación no va a influir en la forma de los granos.

A continuación se muestran dos fotografías (Fig.5.15 y Fig.5.16) de las probetas DC01 obtenidas en el Dome Test. En ambas fotografías la dirección en sentido del espesor de la pieza coincide con el eje horizontal. La Fig.5.15 pertenece a la probeta obtenida del ensayo en estado de deformación plana y la Fig.5.16 pertenece a la probeta obtenida en el estado biaxial.





**Fig.5.15. DC01 estado de deformación plana. El eje horizontal coincide con el espesor**

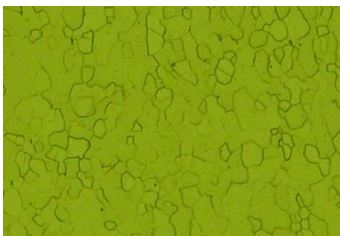


**Fig.5.16. DC01 estado biaxial. El eje horizontal coincide con el espesor**

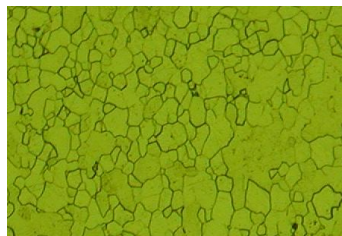
Las fotografías pertenecen al punto de fractura y en ellas se puede apreciar cómo el espesor de la pieza ha disminuido en este punto y la aparición de los huecos que dan lugar a la fractura.

### 5.2.2. RESULTADOS DEL DC06

Al igual que en el caso DC01 las figuras que se muestran a continuación (Fig.5.17 a Fig.5.22) son probetas obtenidas de los conos conformados por SPIF del acero DC06. En todas ellas, el eje vertical coincide con la dirección de laminación (LD) y a su vez con la dirección de la pared del cono (dirección radial, RD), el horizontal con el espesor y han sido obtenidas con el LOM bajo el mismo número de aumentos. Cada una de las fotografías corresponde a una probeta distinta, que procede de un cono conformado con un determinado ángulo de inclinación de pared.



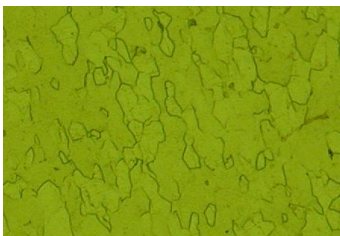
**Fig.5.17. DC06 10° LD y RD coinciden con el eje vertical**



**Fig.5.18. DC06 20° LD y RD coinciden con el eje vertical**



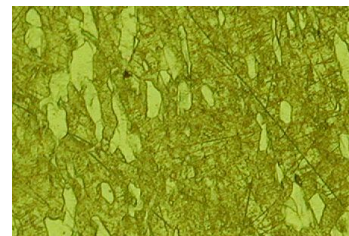
**Fig.5.19. DC06 30° LD y RD coinciden con el eje vertical**



**Fig.5.20. DC06 40° LD y RD coinciden con el eje vertical**



**Fig.5.21. DC06 50° LD y RD coinciden con el eje vertical**

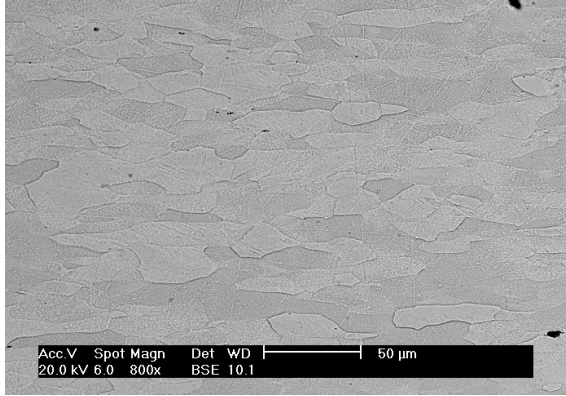


**Fig.5.22. DC06 60° LD y RD coinciden con el eje vertical**

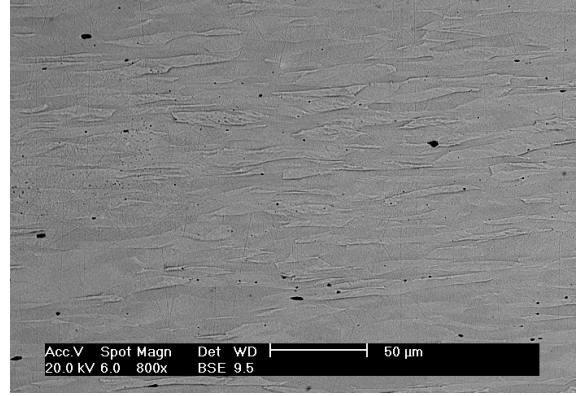
Como era de esperar, se ha visto en las fotografías mostradas que, conforme aumenta el ángulo de inclinación de pared, aumenta la deformación de los granos en sentido de la dirección de la pared del cono (dirección radial).

## 5. ESTUDIO MICROESTRUCTURAL

La Fig.5.23 muestra la probeta de acero DC06 con un ángulo de inclinación de 50° con el microscopio SEM. De la misma manera, la Fig.5.24 muestra la probeta de acero DC06 con un ángulo de inclinación de 65°. En ambas fotografías el eje horizontal coincide con la dirección de laminación (LD) y la dirección radial del cono (RD).



**Fig.5.23. DC06 50° LD y RD coinciden con el eje horizontal**

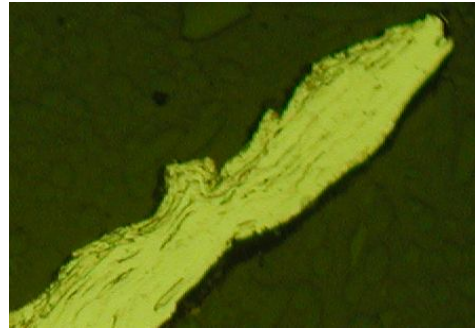


**Fig.5.24. DC06 65° LD y RD coinciden con el eje horizontal**

Finalmente se muestran dos fotografías (Fig.5.25 y Fig.5.26) de las probetas DC06 obtenidas en el Dome Test. En ambas fotografías la dirección en sentido del espesor de la pieza coincide con el eje horizontal. La Fig.5.25 pertenece a la probeta obtenida del ensayo en estado de deformación plana y la Fig.5.26 pertenece a la probeta obtenida en el estado biaxial.



**Fig.5.25. DC06 estado de deformación plana. El eje horizontal coincide con el espesor**



**Fig.5.26. DC06 estado biaxial. El eje horizontal coincide con el espesor**

Las fotografías pertenecen al punto de fractura y en ellas se puede apreciar cómo el espesor de la pieza ha disminuido en este punto y la aparición de los huecos que dan lugar a la fractura.

## 6. CONCLUSIONES FINALES

Las conclusiones y resultados generales de este proyecto se van a comentar a continuación

En primer lugar, de los ensayos de Dome Test realizados se ha obtenido el diagrama límite de conformado de los aceros DC01 y DC06. Para ello, se han buscado dos puntos de esta curva en concreto, el punto dado por el estado de deformación plana y el punto dado por el estado biaxial. El punto del estado de deformación plana ha sido alcanzado gracias a un ancho específico de la chapa de acero y los resultados obtenidos concuerdan de manera casi perfecta con los resultados obtenidos vía otros métodos. Sin embargo, no ocurre lo mismo en el caso del estado biaxial, puesto que los resultados obtenidos se alejan de forma considerable de los resultados obtenidos por otros métodos y los facilitados por el propio proveedor (Fig.6.1).

La Fig.6.1 muestra la curva límite de conformado típica para un acero general. Como se puede observar en dicha figura, en el estado de deformación plana (donde la  $\epsilon_{\text{menor}}$  es igual a 0) se alcanzan los valores más pequeños para la  $\epsilon_{\text{mayor}}$ . Los valores más altos para la  $\epsilon_{\text{mayor}}$  se alcanzan cuando la  $\epsilon_{\text{menor}}$  es negativa, esto es, en el lado izquierdo de la FLC.

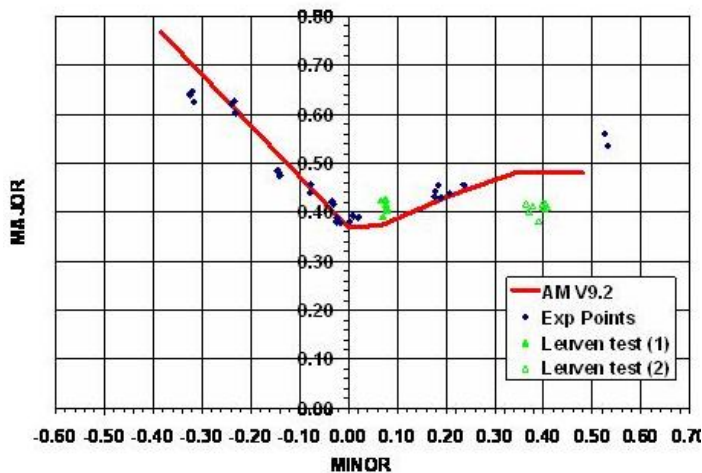


Fig.6.1 FLC típica para el acero DC06 ofrecida por el fabricante

Como se puede observar en la Fig.6.1, donde los puntos verdes son los resultados experimentales de la deformación obtenidos a lo largo de este proyecto, en el estado de deformación plana se produce una correspondencia bastante buena entre los datos obtenidos y los ofrecidos (puntos azules) por esta curva (facilitada por Arcelor, proveedor del acero con el que se ha trabajado). Sin embargo, hay una diferencia más notable en el estado biaxial y los datos que se han obtenido son más bajos que los esperados. Esta diferencia ha sido vista en los dos aceros, DC01 y DC06, lo cual hace pensar que el problema no está en el material sino en el proceso.

Algunas razones que podrían explicar esta diferencia son:

- Problemas de fricción debido a unas condiciones de lubricación no suficientes. La fricción da lugar a una rotura temprana de la probeta debido al incremento de fuerzas. Aunque en todos los ensayos se ha procurado evitar este tipo de problemas



mediante una buena lubricación, en ningún momento se puede asegurar la completa ausencia de fricción.

- Una insuficiente presión inicial de sujeción de la probeta. La probeta tiende a deslizar en dirección a la aplicación de la carga y a romperse antes de lo previsto.

- Una combinación de estas dos causas también es probable, teniendo en cuenta que la existencia de fricción incrementando las fuerzas en combinación con una mala sujeción de la probeta hacen que la probeta se deslice más y de forma más rápida.

En segundo lugar, analizando los resultados obtenidos en la distribución del espesor para los tres materiales analizados (aluminio, acero DC01 y acero DC06) se ha constatado que la dirección en la que se mide el espesor no influye en el resultado y, por tanto, la distribución del espesor es la misma en la dirección de laminación que en la dirección transversal, y las pequeñas diferencias que se observan pueden atribuirse a errores cometidos durante la toma de datos.

En cuanto a la ley de Sine, se ha determinado que de esta ley se puede obtener una buena aproximación del espesor final, siempre y cuando este espesor final sea tomado como la media de la distribución de los espesores a lo largo de la pared del cono. Por otro lado, la diferencia entre los espesores predichos y medidos es mayor en el caso de los aceros que en el caso del aluminio, lo cual puede ser debido a que esta ley no tiene en cuenta las propiedades de cada material ya que solo es función del espesor inicial y del ángulo de inclinación de pared.

En cuanto al análisis de la forma en que se distribuye el espesor a lo largo de la pared de los conos dependiendo del ángulo de inclinación de pared, se puede ver como cuando el ángulo de inclinación es pequeño, y bastante alejado del valor límite se produce al principio un descenso del espesor hasta un cierto valor que permanece constante a lo largo de la pared. Sin embargo, cuando el ángulo de inclinación de pared se hace más grande y se acerca más a su valor límite, además de este primer descenso del espesor, se produce un segundo descenso hasta alcanzarse el valor más pequeño del espesor en el cono. Este segundo descenso se produce en la parte superior de la pared del cono y cuanto mayor sea el ángulo de inclinación, más profundo es este descenso. Debido a este descenso brusco del espesor cabe esperar que la fractura del cono se produzca en esta zona.

En tercer lugar y en relación al ángulo de deformación tangencial se ha constatado la gran influencia que ejerce sobre este ángulo el ángulo de inclinación de pared del cono. Esto demuestra que la deformación tangencial se hace más significativa y alcanza mayores valores cuanto mayor sea el ángulo de inclinación de pared. Por tanto, se ha demostrado que estos dos ángulos guardan entre sí una relación directamente proporcional.

Se han observado también pequeñas diferencias entre los ángulos de deformación tangencial medidos en función de la posición en el cono, es decir, entre los medidos en la dirección de laminación y los medidos en la dirección transversal; sin embargo no se ha podido encontrar una relación que confirme que la dirección en la que se mide el ángulo de deformación tangencial influye en el resultado.

En cuanto al uso del método de los agujeros perforados para la medición de la deformación se ha concluido que este método puede ser aplicado para obtener la deformación sólo cuando el ángulo de inclinación de pared es pequeño, que es cuando el valor del incremento de volumen de los agujeros es bajo y poco significativo. Cuando el ángulo de inclinación de pared se hace más grande aumenta el incremento de

volumen del agujero de manera considerable y éste método pierde su validez, debido a que los agujeros actúan como defectos en la chapa. Al actuar los agujeros como defectos pueden aparecer concentraciones de tensión y los resultados de deformación y ángulo de deformación tangencial resultan erróneos.

Por otro lado, el efecto de la composición de los aceros en el ángulo límite de inclinación de pared ha sido estudiado comparando los resultados del ángulo límite para ambos aceros, y observándose que para el DC01, que es el de mayor contenido en carbono, éste ángulo es mayor. Por tanto, se demuestra que éste ángulo es función del contenido en carbono, aumentando conforme lo hace su contenido.

En cuarto lugar se ha visto en las fotografías de las microestructuras mostradas que conforme aumenta el ángulo de inclinación de pared aumenta la deformación de los granos en dirección de la pared del cono (dirección radial).

Por otro lado, se ha mostrado como cuando la fotografía es tomada en la dirección de la herramienta (HD), la distribución de la forma de los granos es completamente distinta, puesto que en este caso, los granos aparecen deformados en dos direcciones en lugar de en una (Fig.5.13 y Fig.5.14) indicando que se está en estado de deformación plana.

También se ha realizado una comparación entre la forma de los granos de una probeta en la dirección de laminación y una probeta en la dirección transversal sin observar ninguna diferencia entre ambas. Por lo tanto, se deduce que después de un proceso SPIF, la dirección de laminación no influye en la forma de los granos.

Finalmente, se han realizado fotografías de las microestructuras de las probetas obtenidas en el Dome Test. Las fotografías pertenecen al punto de fractura y en ellas se puede apreciar cómo el espesor de la pieza ha disminuido en este punto y la aparición de los huecos que dan lugar a la fractura.

## 7. REFERENCIAS

- [Ref] FILLICE L., FRATINI L. and MICARI F. “Analysis of materials formability in incremental forming”. CIRP Annals-Manufacturing Technology Vol. 51, Issue 1, Pages 199-202, 2002
- [Ref] HAGAN E. and JESWIET J., “A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods”. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture, 2002
- [Ref] HAGAN E. and JESWIET J., “Effect of wall angle on Al3003 strain hardening for parts formed by computer numerical control incremental forming”. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture, 2003
- [Ref] ISO (the international organization for standardization). “Metallic materials-Determination of forming limit diagrams. Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory”. ISO/WD 12004:2004 E, 2004
- [Ref] FAHRETTIN O. and DAEYONG L., “Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test”. Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 247-253, 2005
- [Ref] JESWIET J. and MICARI F. “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal”. CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 54. Issue 2, pages 88-114, 2005
- [Ref] HUSSEIN G., GAO L. and DAR N. U., “An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming”. Journal of Materials Processing Technology 186 (2007) 45-53, 2007
- [Ref] FLORES P., BONNET F. and HABRAKEN A. M. “Plane strain test for metal sheet characterization”. Key Engineering Materials Vol. 344 (2007) pp. 135-142, 2007
- [Ref] EYCKENS P., VAN BAEL A. and VAN HOUTTE P., “An extended Merciniak-Kuczynski forming limit model to assess the influence of through-thickness shear on formability”, 2008
- [Ref] 2008. Private Communication by Arcelor Mittal.

<http://www.sciencedirect.com>

<http://apps.isiknowledge.com>

<http://www.matweb.com>

<http://www.mtm.kuleuven.be/Research/Equipment/List.html>

# LIST OF SYMBOLS

FLD	Forming Limit Diagram
FLC	Forming Limit Curve
SPIF	Single Point Incremental Forming
$t_f$	Final Thickness
$t_i$	Initial Thickness
$L_{real} (L_r)$	Real Longitude
$L_{measured} (L_m)$	Measured Longitude
$L_{original} (L_0)$	Original Longitude
$R_{dome} (R_d)$	Dome Radius
eps_major	Major True Strain
eps_minor	Minor True Strain
eps_major_parab	Major True Strain Parabola Fit
eps_minor_parab	Minor True Strain Parabola Fit
eps_predicted	Predicted True Strain
A.1.	Appendix 1
A.2.	Appendix 2
T18	Test Number 18
T22	Test Number 22
T33	Test Number 33
T37	Test Number 37
TTS	Through Thickness Shear
RD	Rolling Direction
TD	Transversal Direction
WD	Wall Direction
PSD	Plane Strain Direction
$a_o$	Major Strain Direction Outside Distance
$a_i$	Major Strain Direction Inside Distance
$b_o$	Minor Strain Direction Outside Distance

$b_i$	Minor Strain Direction Inside Distance
$a_0$	Major Strain Direction Original Distance
$b_0$	Minor Strain Direction Original Distance
$A_1$	Area of the Large Surface
$A_2$	Area of the Small Surface
$a$	First Axis of the Ellipse
$b$	Second Axis of the Ellipse
$t$	Thickness
$H$	Height of the Cylinder
$V_1$	Volume of the Large Cone
$V_2$	Volume of the Small Cone
$V_{\text{final}}$	Final Volume
$V_{\text{original}}$	Original Volume
SEM	Scanning Electron Microscope
LOM	Light Optical Microscope
DT	Dome Test
$\Delta z$	Incremental Step Down
$\alpha$	Wall Angle
$\alpha_{\text{max}}$	Maximum Wall Angle
$\epsilon_{\text{min}}$	Minor True Strain
$\epsilon_{\text{max}}$	Major True Strain
$\epsilon_{\text{thickness}}$	True Strain in the Thickness Direction
$\epsilon_{\text{Sine}}$	Sine Predicted True Strain
$l_1$	Final Dimension 1
$l_1^0$	Original Dimension 1

# LIST OF FIGURES

Fig.2.1. A schematic of forming limit diagram .....	2
Fig.2.2. FLC for conventional and incremental forming for AA1050-0 .....	3
Fig.2.3. Deformation of elements in a shear formed cone .....	4
Fig.2.4. Variants of single point incremental forming .....	5
(a) <i>Negative incremental forming</i> .....	5
(b) <i>Positive incremental forming</i> .....	5
Fig.3.1. AA3103 texture.....	9
Fig.3.2. DC01 texture.....	10
Fig.3.3. DC01. The rolling direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally.....	11
Fig.3.4. DC01. The transversal direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally.....	11
Fig.3.5. DC06. The rolling direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally.....	11
Fig.3.6. DC06. The transversal direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally.....	11
Fig.4.1. Instron 1196.....	12
Fig.4.2. ME96 equipment.....	13
Fig.4.3. Electrolyte.....	13
Fig.4.4. Neutraliser .....	14
Fig.4.5. Picture sample 18 DC01 .....	15
Fig.4.6. Picture sample 19 DC01 .....	15
Fig.4.7. Picture sample 22 DC01 .....	16
Fig.4.8. Picture sample 23 plane DC01 .....	16
Fig.4.9. Picture sample 33 DC06. The rolling direction lies horizontally .....	17
Fig.4.10. Picture sample 34 DC06. The rolling direction lies horizontally .....	17
Fig.4.11. Picture sample 36 DC06. The rolling direction lies horizontally .....	18
Fig.4.12. Picture sample 37 DC06. The rolling direction lies horizontally .....	18
Fig.4.13. Picture of $a_o$ and $b_o$ outer distances .....	19
Fig.4.14. Picture of $a_i$ and $b_i$ inner distances .....	19
Fig.4.15. Leica MZ8 stereomicroscope.....	19
Fig.4.16. Representative figure of the calculations .....	20
Fig.4.17. Strain on line 2 of the test 18.....	21
Fig.4.18. Strain on line 3 of the test 22.....	22
Fig.4.19. FLC of DC01 .....	22

Fig.4.20. Strain on line 2 of the test 18.....	23
Fig.4.21. Strain on line 1 of the test 37.....	24
Fig.4.22. FLC DC06 .....	24
Fig.4.23. Typical FL curve for DC06, from [Ref] .....	25
Fig.5.1. Aciera F45 picture.....	27
Fig.5.2. Picture of one cone once the samples for thickness were cut.....	28
Fig.5.3. Representation of the piece's shape for the thickness measurement with aluminium.....	28
Fig.5.4. Picture of the sample for the thickness measurement .....	29
Fig.5.5. Thickness profile for the sample with 72° wall angle .....	29
Fig.5.6. Thickness profile for the sample with 75° wall angle .....	30
Fig.5.7. Thickness profile for the sample DC01 with 20° wall angle .....	31
Fig.5.8. Thickness profile for the sample DC01 with 65° wall angle .....	31
Fig.5.9. Thickness profile for the sample DC01 with 67° wall angle .....	32
Fig.5.10. Thickness profile for the sample DC06 with 10° wall angle .....	33
Fig.5.11. Thickness profile for the sample DC06 with 55° wall angle .....	33
Fig.5.12. Thickness profile for the sample DC06 with 66° wall angle .....	34
Fig.5.13. picture of the cone .....	35
Fig.5.14. Representation of the angles A and B .....	36
Fig.5.15. Picture of the goniometer .....	36
Fig.5.16. Representation of the position of the drilled holes .....	38
Fig.5.17. Picture of the hole .....	38
Fig.5.18. Representative figure of the strain calculations .....	39
Fig.5.19. Cut pieces for shear measurement .....	41
Fig.5.20. Piece of Cone 7 in the RD outer surface .....	41
Fig.5.21. Piece of cone 7 in the RD inner surface .....	41
Fig.5.22. Piece of cone 8 in the RD outer surface .....	42
Fig.5.23. Piece of cone 8 in the RD inner surface .....	42
Fig.5.24. Picture of the outer surface .....	45
Fig.5.25. Picture of the inner surface .....	45
Fig.5.26. Thickness strain measurement .....	47
Fig.6.1. Predopress picture .....	49
Fig.6.2. Pedemax picture.....	50
Fig.6.3. SEM picture.....	50
Fig.6.4. Carbon wire coater.....	52

Fig.6.5. DC01 10° wall angle RD and WD lie vertically .....	52
Fig.6.6. DC01 20° wall angle RD and WD lie vertically .....	52
Fig.6.7. DC01 30° wall angle RD and WD lie vertically .....	52
Fig.6.8. DC01 20° wall angle. The RD and the WD lie vertically .....	53
Fig.6.9. DC01 40° wall angle RD and WD lie vertically .....	53
Fig.6.10. DC01 50° wall angle RD and WD lie vertically .....	53
Fig.6.11. DC01 66° wall angle RD and WD lie vertically .....	53
Fig.6.12. DC01 40° wall angle. The RD and the WD lie horizontally .....	53
Fig.6.13. DC01 60° wall angle RD and WD lie vertically .....	54
Fig.6.14. DC01 60° wall angle TD and WD lie vertically .....	54
Fig.6.15. DC01 60° wall angle RD. thickness direction lies vertically and PSD lies horizontally.....	54
Fig.6.16. DC01 60° wall angle TD. Thickness direction lies vertically and PSD lies horizontally.....	54
Fig.6.17. DC01 60° wall angle. The RD and the WD lie vertically .....	54
Fig.6.18. DC01 67° wall angle RD and WD lie vertically .....	55
Fig.6.19. DC01 67° wall angle RD. thickness direction lies vertically and PSD lies horizontally.....	55
Fig.6.20. DC01 67° wall angle. The RD and the WD lie vertically .....	55
Fig.6.21. DC01 plane strain state. The thickness direction lies horizontally. ....	55
Fig.6.22. DC01 equibiaxial state. The thickness direction lies horizontally. ....	55
Fig.6.23. DC06 10° wall angle RD and WD lie vertically .....	56
Fig.6.24. DC06 20° wall angle RD and WD lie vertically .....	56
Fig.6.25. DC06 30° wall angle RD and WD lie vertically .....	56
Fig.6.26. DC06 10° wall angle and. The RD and the WD lie vertically .....	56
Fig.6.27. DC06 40° wall angle RD and WD lie vertically .....	56
Fig.6.28. DC06 50° wall angle RD and WD lie vertically .....	56
Fig.6.29. DC06 60° wall angle RD and WD lie vertically .....	56
Fig.6.30. DC06 50° wall angle. The RD and the WD lie horizontally .....	57
Fig.6.31. DC06 65° wall angle RD and WD lie vertically .....	57
Fig.6.32. DC06 66° wall angle RD and WD lie at 45° .....	57
Fig.6.33. DC06 67° wall angle RD and WD lie vertically .....	57
Fig.6.34. DC06 65° wall angle. The RD and the WD lie horizontally .....	58
Fig.6.35. DC06 plane strain state. The thickness direction lies horizontally. ....	58
Fig.6.36. DC06 equibiaxial state. The thickness direction lies horizontally.....	58



# LIST OF TABLES

Table3.1. AA3103 properties .....	8
Table3.2. AA3103 composition.....	8
Table3.3. DC01 properties .....	9
Table3.4. DC01 composition.....	9
Table3.5. DC06 properties .....	11
Table3.6. DC06 composition.....	11
Table4.1. Technical details of Instron 1196 (250 kN.) .....	12
Table4.2. Original grid dimensions .....	18
Table4.3. average original dimensions (microns).....	19
Table4.4. Technical details for Stereo microscope Leica MZ8.....	20
Table4.5. Points that give the DC01 FLC .....	23
Table4.6. Points that give the DC06 FLC .....	25
Table5.1. Aluminium cones details .....	29
Table5.2. DC01 cones details .....	30
Table5.3. DC06 cones details .....	32
Table5.4. Technical details for Stereo microscope Leica MZ8.....	37
Table5.5. Aluminium cones details for shear measurement .....	41
Table5.6. Calculation results for shear.....	42
Table5.7. influence of the wall angle on the shear angle. Average shear angles. ....	43
Table5.8. influence of the thickness on the shear angle.....	43
Table5.9. influence of the tool diameter on the shear angle .....	44
Table5.10. Shear angles for 50° wall angle .....	44
Table5.11. DC01 cones details .....	45
Table5.12. Influence of the wall angle on the shear angle for DC01 .....	46
Table5.13. DC01 strain measurement.....	46
Table6.1. Predopress technical details .....	49
Table6.2. Leica DMILM HC.....	50
Table6.3. PHILIPS scanning electron microscope XL30 FEG technical details .....	51
Table6.4. Carbon wire coater technical details.....	52

# TABLE OF CONTENTS

1. GENERAL INTRODUCTION.....	1
2. LITERATURE REVIEW .....	2
2.1. INTRODUCTION .....	2
2.2. FORMING LIMIT DIAGRAM (FLD).....	2
2.3. SINE LAW .....	3
2.4. SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING EXPERIMENTS.....	4
2.5. CONCLUSION .....	7
3. MATERIAL .....	8
3.1. ALUMINIUM AA3103 .....	8
3.2. STEEL DC01.....	9
3.3. STEEL DC06.....	11
4. DOME TEST .....	12
4.1. METHOD.....	12
4.1.1. INSTRON 1196.....	12
4.1.2. ELECTROCHEMICAL STRAIN GRID MARKING: ME96 STRAIN GRID UNIT .....	13
4.1.3. DC01 .....	14
4.1.4. DC06.....	16
4.2. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION .....	18
4.2.1. DC01 .....	21
4.2.2. DC06.....	23
4.3. CONCLUSION .....	25
5. SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING .....	27
5.2. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION .....	27
5.2.1. THICKNESS MEASUREMENT.....	27
5.2.1.1. ALUMINIUM EXPERIMENTAL RESULTS .....	29
5.2.1.2. DC01 EXPERIMENTAL RESULTS.....	30
5.2.1.3. DC06 EXPERIMENTAL RESULTS.....	32
5.2.1.4. CONCLUSIONS FOR THE THICKNESS MEASUREMENT .....	34
5.2.2. SHEAR ANGLE MEASUREMENT .....	35
5.2.2.1. METHOD .....	36
5.2.2.2. ALUMINIUM EXPERIMENTAL RESULTS .....	41

5.2.2.3. DC01 EXPERIMENTAL RESULTS.....	45
5.2.2.4. CONCLUSION FOR SHEAR ANGLE MEASUREMENT .....	47
5.3. CONCLUSIONS .....	48
6. MICROSCOPE .....	49
6.1. METHOD.....	49
6.1.1. LIGHT OPTICAL MICROSCOPE.....	50
6.1.2. SCANNING ELECTRON MICROSCOPE.....	50
6.2. EXPERIMENTAL RESULTS .....	52
6.2.1. DC01 EXPERIMENTAL RESULTS.....	52
6.2.2. DC06 EXPERIMENTAL RESULTS.....	56
6.3. CONCLUSIONS .....	58
7. GENERAL CONCLUSIONS.....	59
8. REFERENCE LIST.....	61

# 1. GENERAL INTRODUCTION

The metal sheet forming industry is constantly searching and developing new technologies that allow saving time and cost. In recent years there are many technologies that have been developed.

The traditional metal stamping technology is very expensive due to the costs linked to the equipments, the punches and dies are manufactured to be close to the shape to be produced, and due to the required set-up times. Therefore the industrial application of traditional stamping technology can be economically justified only for large scale production. On the other hand the traditional processes permit to achieve a satisfying level of hard automation, but they strongly lack flexibility.

Incremental forming is an innovative sheet metal forming technology in which a blank is plastically deformed through the progressive action of a small-size punch, whose movement is governed by a CNC machine. In this way the tool locally deforms the material through an almost pure stretching deformation technique.

The present project compares the microstructural evolution between two different deformation processes: the single point incremental forming process (SPIF) versus the forming limit dome test. These processes have approximately the same overall resulting deformation (plane strain), nevertheless with a very different deformation history. With “plane strain” it is meant here that the total strain in one particular direction in the plane of the sheet is equal to zero.

This project will deal with the microstructural analysis of three different materials, aluminium 3103 and two different kind of steel, DC01 and DC06 which have different carbon content.

Chapter 2 pretends to give an idea on what incremental forming and the Dome test is. The reader will find descriptions of different processes and studies of different mechanical and metallurgical aspects.

Chapter 3 will give to the reader an idea about the different material that have been used in the present project

Chapter 4 will deal with the Dome Test process. This will serve to obtain the forming limit diagram of the materials and make possible a comparison between this process and the incremental process.

Chapter 5 will deal with the single point incremental forming process. Thickness profile of the cones and shear angle will be derived from this part in order to obtain more information about this process.

Chapter 6 will deal with the microstructural aspects of the tested samples in the Dome Test and in the single point incremental forming and compare them.

## 2. LITERATURE REVIEW

### 2.1. INTRODUCTION

The last few decades the metal forming industries have to face new relevant needs as the production of small batches of sheet metal components, the increasing demand of process flexibility and the necessity to reduce the time to market of the products. All these needs are inconsistent with the features of traditional metal stamping processes. As a consequence new forming processes which do not require expensive conventional equipments and the time consuming set-up operations have been recently proposed, usually classified as incremental forming processes.

### 2.2. FORMING LIMIT DIAGRAM (FLD)

Sheet metal formability is generally defined as the ability of a metal to deform into desired shape without necking or fracture. Each type of sheet metal can be deformed only to a certain limit that is usually imposed by the onset of localised necking, which eventually leads to the ductile fracture.

A well-known method of describing this limit is the forming limit diagram FLD. The left side of the FLD consists of negative minor and positive major strains, which represent many strain paths from tensile to plane strain tests. The right side of the FLD, defined by positive major and positive minor strains, covers many strain ratios from plane strain to balanced biaxial stretching.

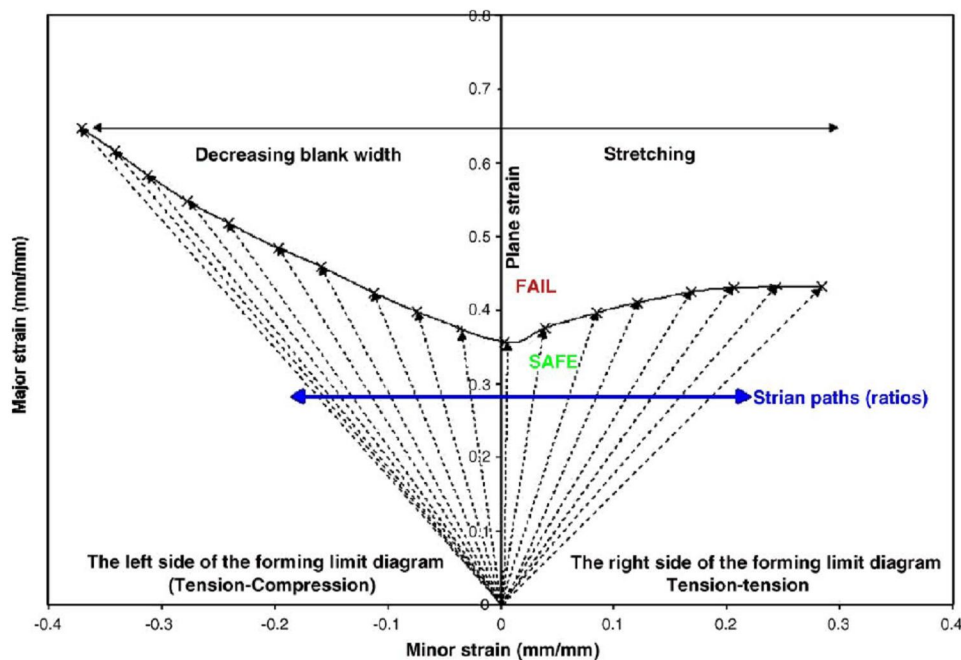


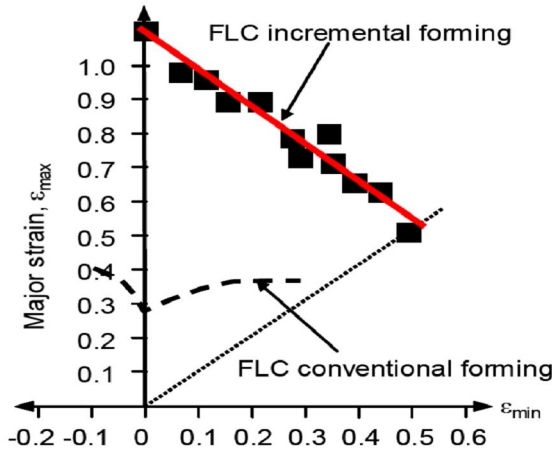
Fig.2.1. A schematic of forming limit diagram

The extent to which the sheet can be stretched before failure occurs is known as the forming limit.

Forming Limit Diagrams (FLD's) consist of forming limit curves plotted in the plane of principal strains. The FLD is presented as a "material-property", although it is

influenced by process parameters as well. The forming limit diagram of the two processes that will be compared in the present project has a completely different shape.

Typical FLD for conventional forming and for incremental forming can be seen in Fig.2.2. The material represented in this figure is aluminium AA1050-0.



**Fig.2.2. FLC for conventional and incremental forming for AA1050-0**

This figure (Fig.2.2) shows that the forming limit curve in incremental forming is quite different from the corresponding one in conventional forming. Much higher strain may be achieved in incremental forming than in traditional processes. Such circumstances can be justified taking into account the peculiarity of the process mechanics. Plastic deformation induced by the small-size punch is strongly localized and confined to the close vicinity of the contact area; then it incrementally progresses as the tool moves along the assigned path. As a consequence higher strains can be attained in the material before that fracture occurs.

Furthermore the forming limit diagram curve for incremental forming processes typically has the shape of a straight line with a negative slope in the first quadrant of the forming limit diagram.

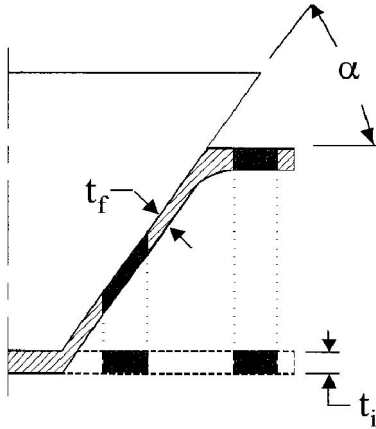
### 2.3. SINE LAW

The Sine Law predicts the wall thickness of shear-formed parts.

The final thickness of a shear-formed part depends on the slope of the formed surface. This easily can be calculated using the Sine law given by the following equation:

$$t_f = t_i * \sin \alpha \quad (2.1)$$

In Fig.2.3 an element is shown for both the wall and flange of a shear-formed cone. There are no internal displacements of material in the flange region, and thus the wall deforms under pure shear.



**Fig.2.3. Deformation of elements in a shear formed cone**

The Sine law is derived from volume conservation. If all material is projected vertically from initial state to the ideal final wall angle, it has a thickness reduction given by the Sine law. However, in reality, material is not necessarily projected vertically, so deviations from the Sine law are possible, for example some regions have a thickness higher than the Sine law and other regions have a thickness lower than the Sine law within a single cone. For the cone as a whole, there is always volume conservation, so that why the Sine law should give an average of the thickness profile.

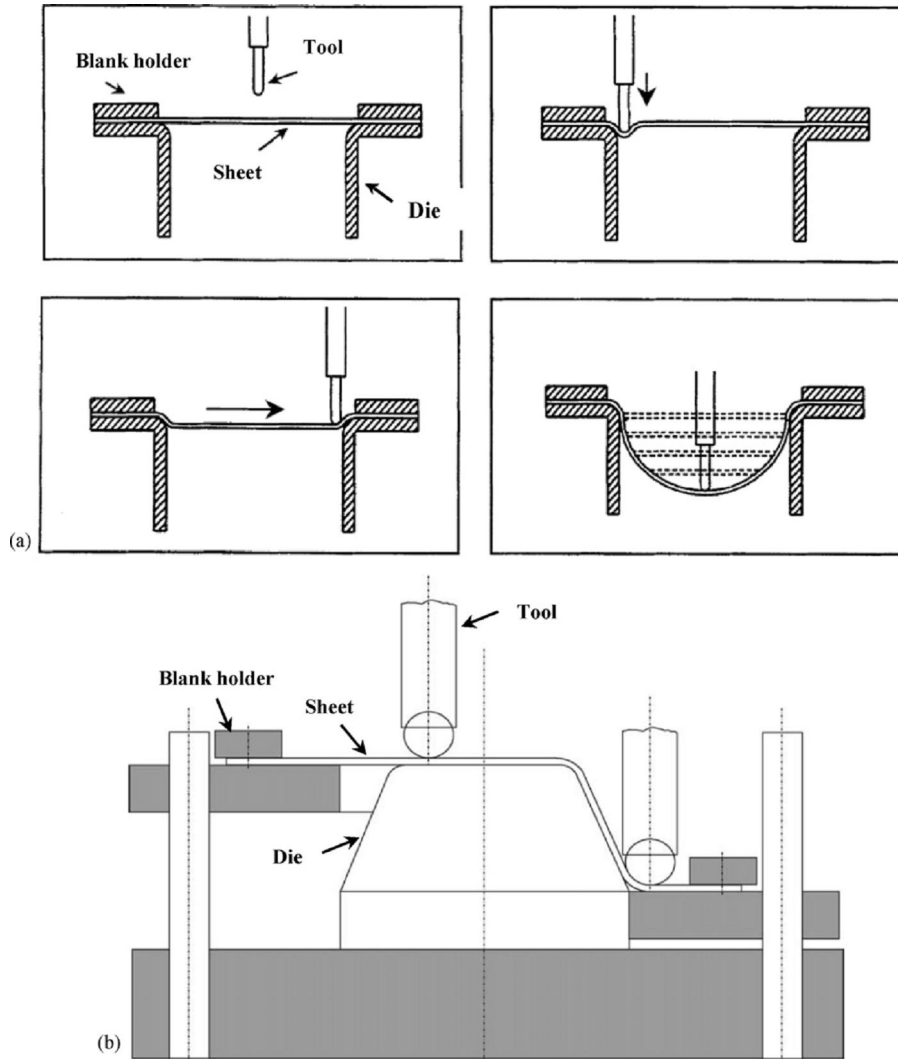
A shear forming process will follow the Sine law if the operating conditions are properly set. In a practical situation the force applied by the forming tool on the blank can be either too or too small. If the force directed in the radial direction is too large, the condition of overspinning will occur and the wall thickness will be less than that given by the Sine law. The opposite situation, known as underspinning, leads to increased wall thickness.

## 2.4. SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING EXPERIMENTS

The basic idea of incremental forming operations is to obtain the desired shape of the part through the movement of a small-size punch along a user-specified path. By this way no conventional punches and dies are required and the final shape of the part only depends on the trajectory assigned to the tool, because it is determined by the sum of the local deformations induced by the punch along its path.

Such basic considerations explain that incremental forming permits a relevant reduction of the costs linked to die manufacture and set-up, as well as it allows to achieve a very high level of process flexibility

SPIF technique is characterized by the possibility of being easily adopted to produce small production batches using low cost tooling. The process has two variants: negative incremental forming and positive incremental forming. In the former variant, the blank is backed with a die that increases the probability to produce parts with sharp corners in contrast with the latter one. A representation of both processes is shown in Fig.2.4.



**Fig.2.4. Variants of single point incremental forming**  
 (a) *Negative incremental forming*  
 (b) *Positive incremental forming*

There are two ways to express the formability: an FLC that presents the limiting strains, and  $\alpha_{\max}$  that is the maximum wall angle without fracture of the sheet metal.

The important parameters in single point incremental forming are the thickness of the sheet metal relative to the maximum wall angle in a part, the size of the incremental step down ( $\Delta z$ ), the speed of deformation and the size of the forming tool.

Ref. (J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou and J. Allwood) studied the influence of the increment step size ( $\Delta z$ ) and the influence of the wall angle. Large increment steps give a higher roughness and cause an orange peel effect. Regarding to the wall angle, it has been established that there is a limitation on the maximum wall angle that can be formed in one pass. With increasing wall angle, the sheet thickness reaches a minimum value where fracture occurs as a consequence. There is a strong dependence of the deformed sheet thickness on the wall angle which can lead to inhomogeneous thickness distribution in the final part.

In Ref. (E. Hagan and J Jeswet [2003]) the change in material properties for annealed Al3003 after computer numerical control incremental forming was studied through a series of tensile tests. A relationship was found, showing an increase in yield



and necking stress for increasing wall angle. In addition, the necking strain was shown to decrease linearly with increasing wall angle owing to strain hardening of the material. A Hollomon equation was determined for Al3003 over the full range of working strain.

Ref. (L. Fillice, L. Fratini and F. Micari [2002]) studied the material formability in incremental forming and developed tests aimed to the achievement of different straining conditions in the material and consequently to the determination of forming limit diagrams for progressive forming operations. The derived conclusions are that the incremental forming is characterized by a local stretching deformation mechanics which determines a forming limit curve quite different from the traditional one. Such FLC has a linear shape with a negative slope in the positive  $\epsilon_{\text{minor}}$  side of the FLD and can be utilized as a CAE tool to design industrial forming processes.

In Ref. (G. Hussain, L. Gao and N. U. Dar [2006]) two tests were conducted to evaluate the formability of aluminium sheet in negative incremental forming. In the first test, collections of cones and pyramids were produced by varying the deformation angle in small steps in order to investigate the maximum wall angle,  $\alpha_{\text{max}}$ , without fracture of the sheet. In the second test, conical pyramids, each having varying wall angle, designed by revolving different curved lines were formed to fracture. The first observation is that in the first test, some parts having sharp corners fractured at the corners, which shows that a corner undergoes greater deformation than a straight side for the same tool path. The second observation is that in the second test, the value of  $\alpha_{\text{max}}$  varies from specimen to specimen, showing that the formability of a sheet depends on the curvature of the generatrix of the test specimen. The third and last observation is that the formability values shown by the second test are higher than that shown by the first test. This is due the fact that the wall angle in each specimen in the second test varies, while the specimens of the first test have constant wall angle.

In Ref. (P. Eyckens, A. Van Bael, P. Van Houtte [2008]) incorporated the Through-Thickness Shear (TTS) deformation in the forming limit model. The formability predictions that take TTS into account indicate that it can indeed be a contributing factor in the high formability of the single point incremental process.

Ref. (J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou and J. Allwood) have studied the asymmetric incremental forming that has the potential to revolutionize sheet metal forming, making it accessible to all levels of manufacturing. Complicated shaped can be formed easily. There are two variations of the process, one with single point doing the forming and the other one with two points where one point is either a partial or full die. This study has found out that the process has tremendous potential and there are many future possibilities where it can be used.

### 2.5. CONCLUSION

Due to the inherent advantages and flexibility, the SPIF process offers the possibility to implement a powerful alternative in the metal sheet forming industry.

The production rate of the novel process is not as high as those of existing ones, nevertheless, some other outstanding features such as flexibility and low cost tooling, make it feasible to manufacture parts in small batches for various applications, which are listed below:

- It is a very economical process for rapid prototyping
- The method creates large regions of homogenous deformation and avoids the large stress and stain gradients.
- It is capable to manufacture a variety of irregular-shaped components and highly customized medical products.

Above all the advantages that this process offers, the higher formability in plane strain state and the flexibility are the most important ones. Nevertheless, this method is still unknown and needs to be more studied.

From the literature, it has been seen that a lot of studies have been carried out; nevertheless a complete understanding of the mentioned process is still not achieved. The current project will try to bring more information about the process, and will work with some of the conclusions and formulations that have been deduced, in order to give a new confirmation of them.

### 3. MATERIAL

The materials used in the present project were Aluminium 3103, steel DC01 and steel DC06.

#### 3.1. ALUMINIUM AA3103

The properties of AA3103 are shown in Table3.1.

**Table3.1. AA3103 properties**

	<b>AA3103</b>
<b>Density</b>	2.6989 g/cc
<b>Young Modulus</b>	68.0 GPa

The composition of AA3103 is shown in Table3.2.

**Table3.2. AA3103 composition**

<b>Material</b>	<b>Si(%)</b>	<b>Fe(%)</b>	<b>Cu(%)</b>	<b>Mn(%)</b>	<b>Zn(%)</b>	<b>Mg(%)</b>	<b>Ti(%)</b>	<b>Cr(%)</b>
<b>AA3103</b>	0,19	0,5	0,07	1,1	0,01	0,01	0,02	0,01

The texture of AA3103 can be seen in Fig.3.1. The texture consists of two families of orientations, called respectively the  $\alpha$ - and the  $\beta$ -fibre. The  $\alpha$ -fibre consists of orientations that all have a  $\langle 011 \rangle$  axis parallel with the rolling plane normal, starting from the Goss orientation ( $G: \{011\} \langle 100 \rangle$ ) and ending with the Brass orientation ( $B: \{011\} \langle 211 \rangle$ ). The  $\beta$ -fibre starts at the Brass orientation and goes over through S ( $S: \{123\} \langle 634 \rangle$ ), sometimes also denoted as  $S \{123\} \langle 412 \rangle$  and ends in Copper (Cu:  $\{112\} \langle 111 \rangle$ ).

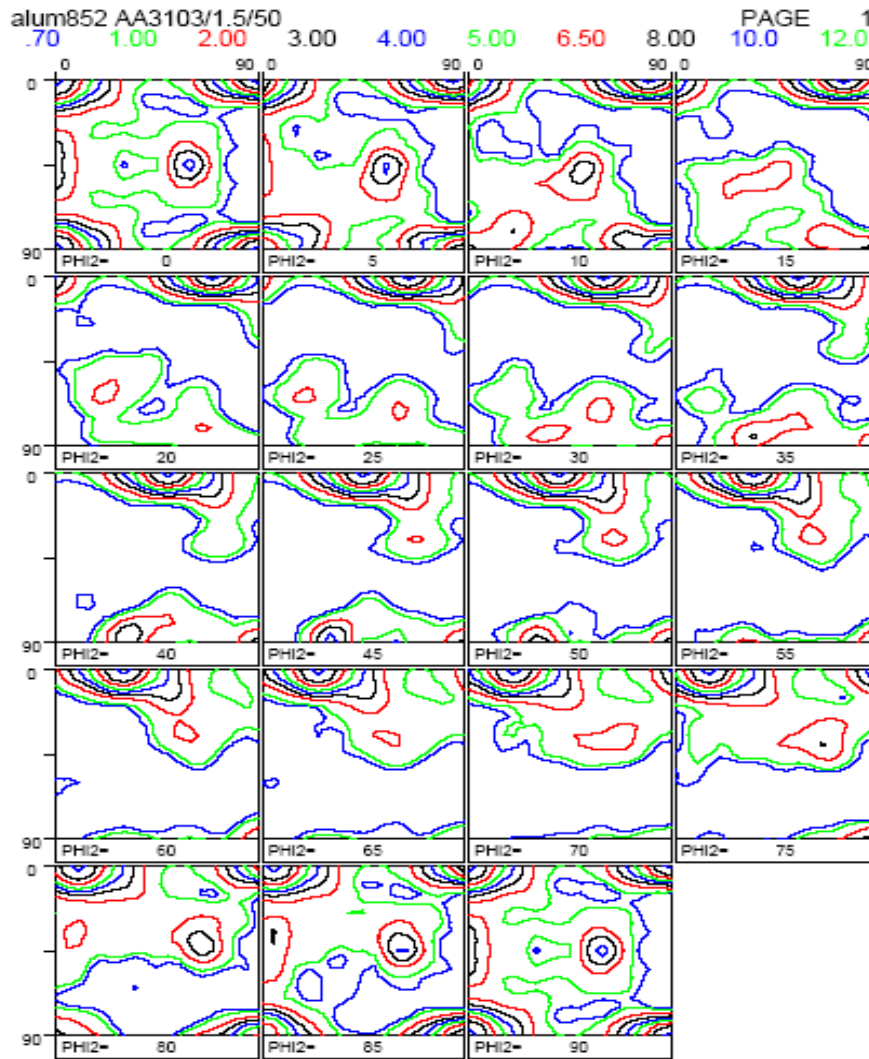


Fig.3.1. AA3103 texture

The initial state of the AA3103 sheets is: “soft” state (fully annealed).

### 3.2. STEEL DC01

The properties of DC01 are shown in Table3.3.

Table3.3. DC01 properties

	DC01
Density	7.87 g/cc
Young Modulus	166 GPa

The composition of DC01 is shown in Table3.4.

Table3.4. DC01 composition

Material	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Al(%)	Ti(%)
DC01	<0.120	<0.60	-	<0.045	<0.035	-	-

The texture of DC01 can be seen in Fig.3.2. The texture consists of two fibres. The alpha-fibre consists of grains with a  $\langle 110 \rangle$  axis parallel to the rolling direction. The gamma-fibre contains orientations with a  $\{111\}$  plane parallel with the rolling plane (or a  $\langle 111 \rangle$  direction parallel with the rolling plane normal)

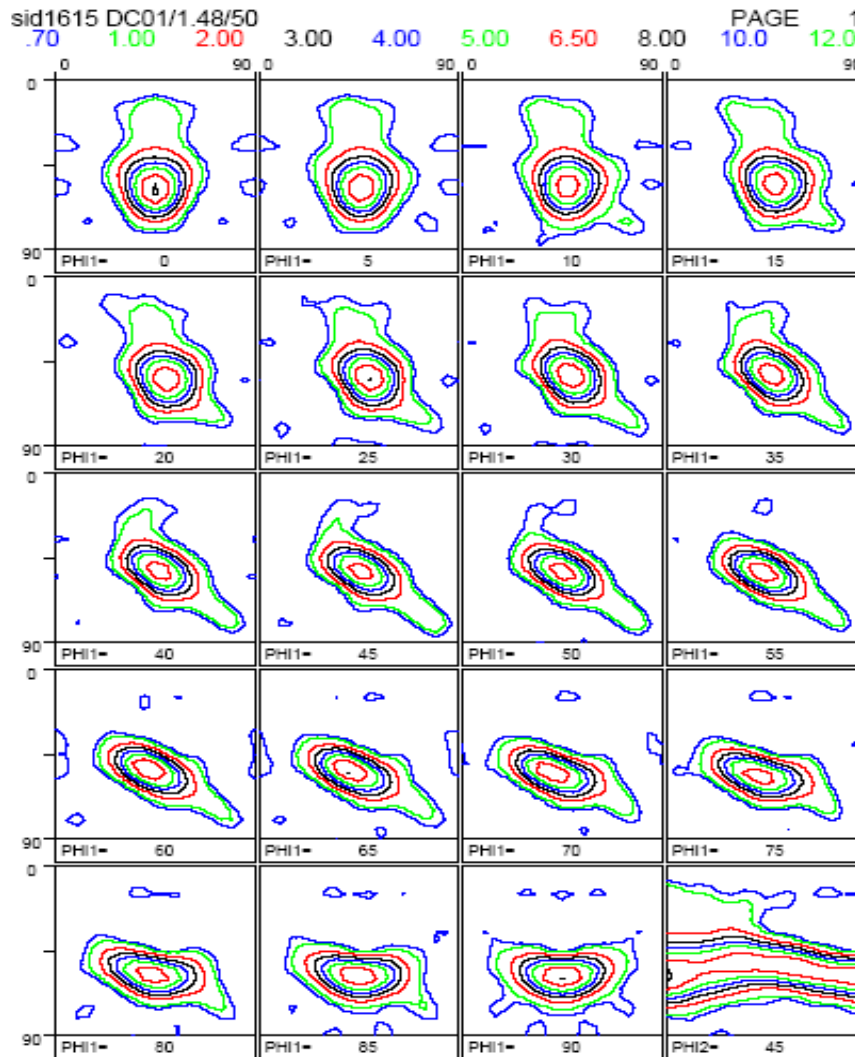
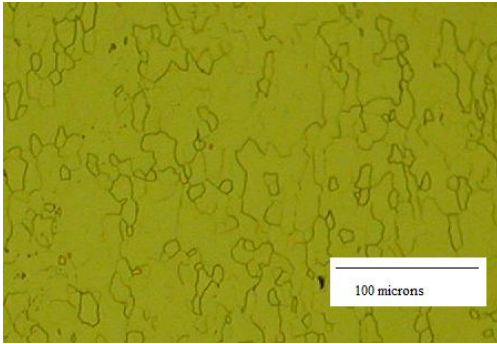


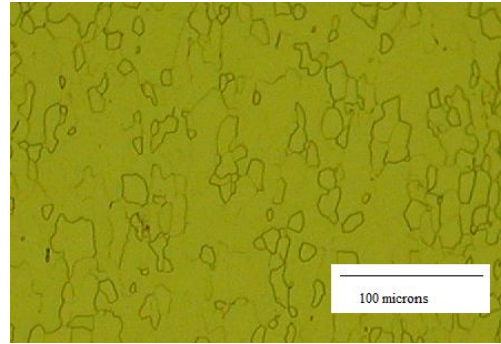
Fig.3.2. DC01 texture

The initial state of DC01 sheets is annealed + subsequent skin rolling passes (few percent of rolling reduction) without galvanization.

The initial microstructure of DC01 can be seen in Fig.3.3. and in Fig.3.4.



**Fig.3.3. DC01.** The rolling direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally



**Fig.3.4. DC01.** The transversal direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally

### 3.3. STEEL DC06

The properties of DC06 are shown in Table3.5.

**Table3.5. DC06 properties**

	<b>DC06</b>
<b>Density</b>	7.87 g/cc
<b>Young Modulus</b>	166 GPa

The composition of DC06 is shown in Table3.6.

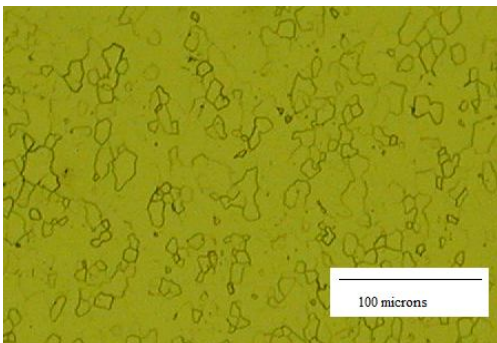
**Table3.6. DC06 composition**

<b>Material</b>	<b>C(%)</b>	<b>Mn(%)</b>	<b>Si(%)</b>	<b>P(%)</b>	<b>S(%)</b>	<b>Al(%)</b>	<b>Ti(%)</b>
<b>DC06</b>	<0.010	<0.25	<0.03	<0.020	<0.020	-	<0.150

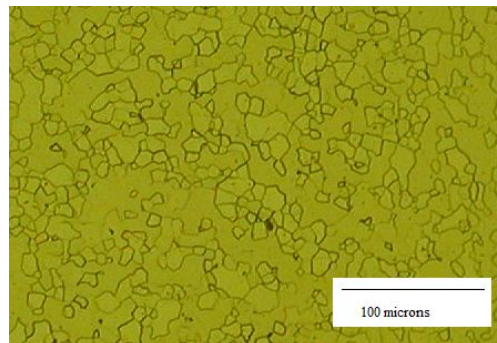
The texture of this material is not studied yet

The initial state of DC06 is the same as DC01, that is, annealed + subsequent skin rolling passes (few percent of rolling reduction) without galvanization

The original microstructure of the DC06 is shown in Fig.3.5 and in Fig.3.6



**Fig.3.5. DC06.** The rolling direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally



**Fig.3.6. DC06.** The transversal direction lies vertically and the thickness direction lies horizontally

## 4. DOME TEST

Dome test is used extensively to determine forming limit diagrams of sheet metals. The sheet metal sample is clamped between circular die rings and is deformed by a hemispherical punch. This technique requires the use of different sample geometries and lubrication conditions to generate all possible strain states and stresses. Each width sample represents one strain path of the FLD.

These tests were carried out in order to obtain the plane strain state. For that, the exact width was needed, and for a successful test the crack should be localised in the centre of the sample or close to it. To reach that point, the best lubrication conditions were taken into account in order to avoid all the friction problems. However problems of symmetry and draw in were found and led to unsuccessful tests with a wrong crack position.

On the other hand, equibiaxial tests were carried out in order to obtain another point of the forming limit diagram becoming possible to draw the right hand of the forming limit diagram of both materials.

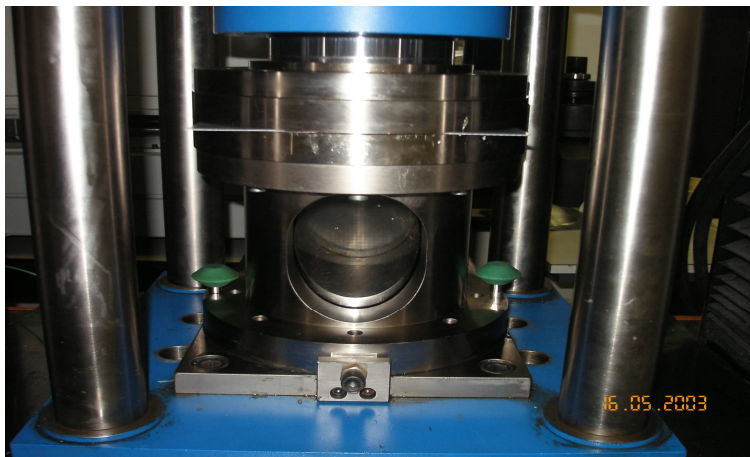
### 4.1. METHOD

#### 4.1.1. INSTRON 1196

Limit Dome Height Tests were carried out on the Instron 1196 on both steels, DC01 and DC06. Technical details of the machine can be read in Table4.1.

**Table4.1. Technical details of Instron 1196 (250 kN.)**

<b>Speed range</b>	0.05-500 mm/min
<b>Max. travel</b>	1400 mm
<b>Clearance between columns</b>	700 mm



**Fig.4.1. Instron 1196**

#### **4.1.2. ELECTROCHEMICAL STRAIN GRID MARKING: ME96 STRAIN GRID UNIT**

Strain grid marking is the method chosen for analysing the strain in the sheets. UMS manufacture a large capacity strain grid marking Unit which is favoured for its ease of marking, speed of operation as well as being stress free.



**Fig.4.2. ME96 equipment**

##### **Checklist:**

- Variable output controls, 100 amps max output
- 280 mm wide stainless steel roller marker with pistol control and output trigger switch
- Etch and oxide functions
- Volt and ammeter
- Hand marker supplied to mark component ID or reference number on test piece
- Carrying handles built into machine cover

##### **Electrolyte:**



**Fig.4.3. Electrolyte**

All electrolytes are water based and full health and safety sheets

##### **Neutralisers:**

Neutralising is required with most of the electrolyte solutions in order to maintain the quality of the mark.





**Fig.4.4. Neutraliser**

### **4.1.3. DC01**

#### **EQUIBIAXIAL STATE**

In order to obtain the equibiaxial state a square sample was needed. Two successful tests were obtained under the same conditions.

The test conditions were:

- Dimension: 218.74x218.74 mm<sup>2</sup>
- Thickness: 1.15 mm
- Grids diameter: 5 mm
- Lubrication was:
  - 1- Grease
  - 2- Circular blank of Teflon
  - 3- Grease
  - 4- Soft PVC
  - 5- Grease
  - 6- Circular blank of Teflon
  - 7- Grease
- Rubber in the machine
- Initial clamping pressure: 150 bar which was applied manually
- Dome speed: 10 mm/min

The final clamping pressure and the dome speed have been varied over the tests in order to obtain the fracture conditions (crack position) explained above. While the dome speed was constant during the test, the clamping pressure suffered a decrease of 30 bar approximately.

In Fig.4.5 and Fig.4.6 it can be seen pictures of the tested samples in the equibiaxial state. From the picture it can be seen the crack position which was correct due to the localization in the centre of the sample. The lines drawn on the samples will be explained below because they demarcate the part cut for the strain measurement.



Fig.4.5. Picture sample 18 DC01

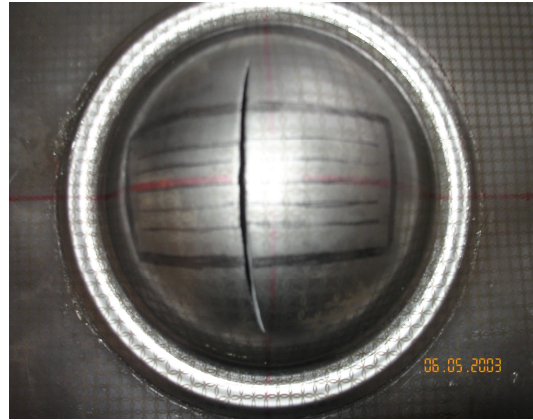


Fig.4.6. Picture sample 19 DC01

#### PLANE STRAIN STATE

In this case many tests with different widths were carried out in order to obtain the desired width, the one which gives the plane strain state. After several tests, the desired dimension was found and two successful tests were obtained under the same conditions.

The test conditions were:

- Dimension:  $218.74 \times 119.86 \text{ mm}^2$
- Thickness: 1.15 mm
- Grids diameter: 5 mm
- Lubrication was:
  - 1- Grease
  - 2- Circular blank of Teflon
  - 3- Grease
  - 4- Soft PVC
  - 5- Grease
  - 6- Circular blank of Teflon
  - 7- Grease
- Initial clamping pressure: 230 bar which was applied manually
- Dome speed: 10 mm/min

As in the equibiaxial state, the initial clamping pressure suffered a decrease, ending up with a pressure of 210 bar

In Fig.4.7 and Fig.4.8 pictures of the tested samples in the plane strain state can be seen.

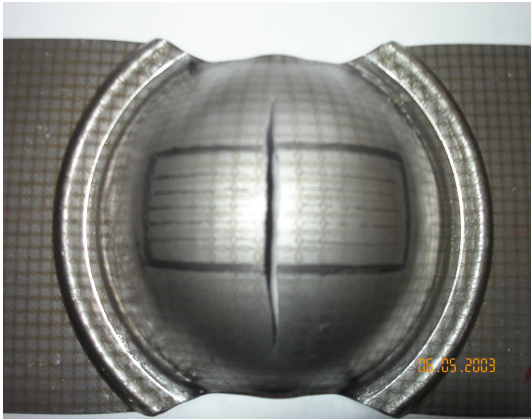


Fig.4.7. Picture sample 22 DC01

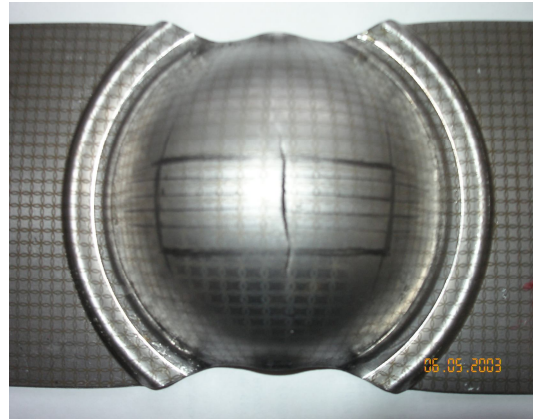


Fig.4.8. Picture sample 23 plane DC01

### 4.1.4. DC06

#### EQUIBIAXIAL STATE

In order to obtain the equibiaxial state a square sample was needed as it was mentioned in DC01 case. Three successful tests were obtained under the same conditions.

The test conditions were:

- Dimension: 225x225 mm<sup>2</sup>
- Thickness: 0.85 mm
- Grids diameter: 5 mm
- Lubrication was:
  - 1- Grease
  - 2- Circular blank of Teflon
  - 3- Grease
  - 4- Soft PVC
  - 5- Grease
  - 6- Circular blank of Teflon
  - 7- Grease
- Initial clamping pressure: 140 bar which was applied manually
- Dome speed: 10 mm./min.

The clamping pressure suffered a decrease of 20 bar approximately, ending up with a pressure of 120 bar.

In Fig.4.9 and Fig.4.10 the tested samples can be seen.



Fig.4.9. Picture sample 33 DC06. The rolling direction lies horizontally

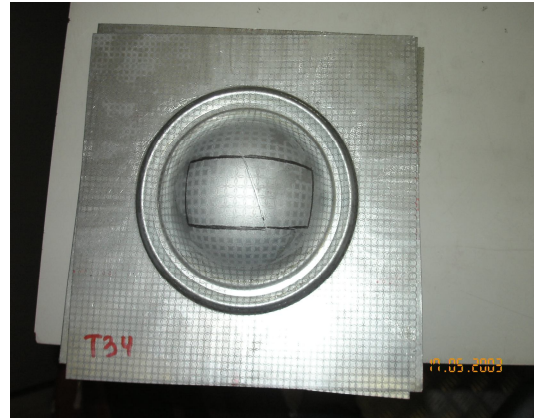


Fig.4.10. Picture sample 34 DC06. The rolling direction lies horizontally

### PLANE STRAIN STATE

In this case, as in DC01, many tests with different widths were carried out in order to obtain the desired width, the one that gives the plane strain state. After several tests, the desired dimension was found and two successful tests were obtained under the same conditions.

The test conditions were:

- Dimension: 225x119.48 mm<sup>2</sup>
- Thickness: 0.85 mm
- Grids diameter: 5 mm
- Lubrication was:
  - 1- Grease
  - 2- Circular blank of Teflon
  - 3- Grease
  - 4- Soft PVC
  - 5- Grease
  - 6- Circular blank of Teflon
  - 7- Grease
- Initial clamping pressure: 200 bar which was applied manually
- Dome speed: 10 mm./min

As in the other cases, the initial clamping pressure suffered a decrease, ending up with a pressure of 180 bar.

In Fig.4.11 and Fig.4.12 pictures of the tested samples can be seen.

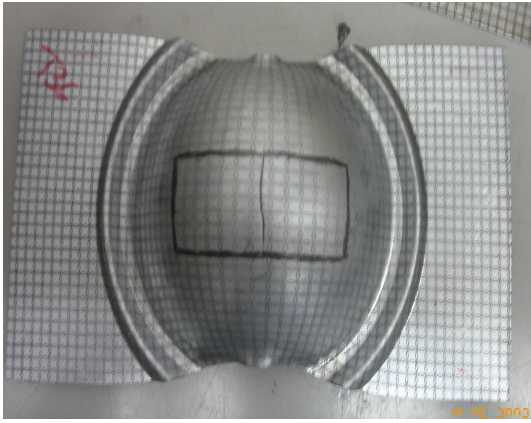


Fig.4.11. Picture sample 36 DC06. The rolling direction lies horizontally

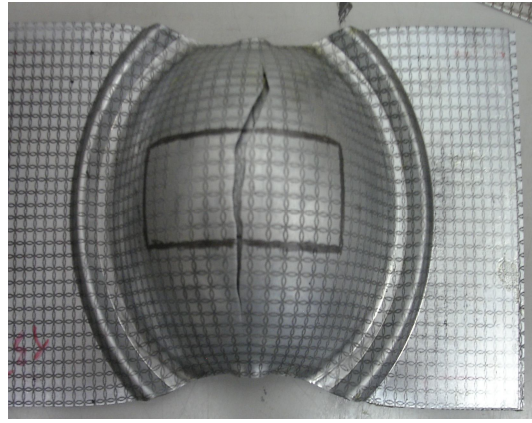


Fig.4.12. Picture sample 37 DC06. The rolling direction lies horizontally

## 4.2. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Before starting with the dome tests, the original grid dimensions were measured for 10 different circles in order to obtain an average of them. These results can be seen in Table 4.2. These measurements were carried out with the Stereo microscope Leica MZ8. Some technical details can be read on Table. For the measurements the Leica image processing and analysis system Qwin has been used. Using the mentioned program it has been possible to obtain the distance between two points of a picture taken with the microscope and it has been possible as well to obtain the value of a drawn area.

Table 4.2. Original grid dimensions

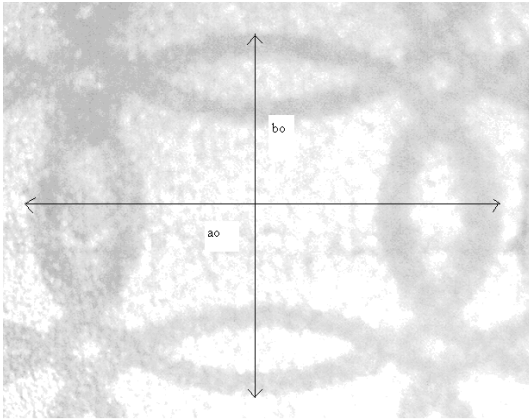
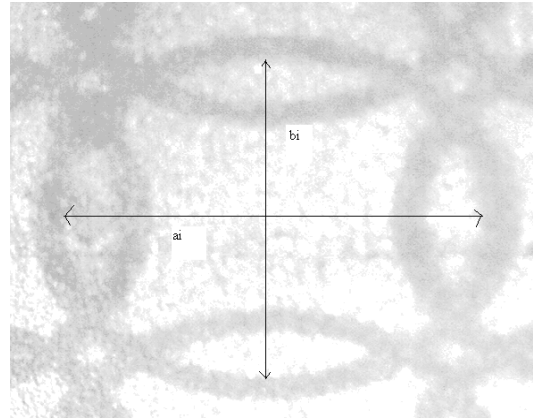
Dimension	Average value (microns)
$a_o$	5374,4
$a_i$	4762,0
$b_o$	5255,1
$b_i$	4693,7

Where:

- $a_o$  is the major strain direction outside distance
- $b_o$  is the minor strain direction outside distance
- $a_i$  is the major strain direction inside distance
- $b_i$  is the minor strain direction inside distance

The difference between these distances can be seen more clearly in Fig. 4.13 and Fig. 4.14.



Fig.4.13. Picture of  $a_o$  and  $b_o$  outer distancesFig.4.14. Picture of  $a_i$  and  $b_i$  inner distances

Finally, for the calculations the average between  $a_o$  and  $a_i$  and the average between  $b_o$  and  $b_i$  were used and called  $a_0$  and  $b_0$ . These results can be seen in Table4.3.  $a_0$  and  $b_0$  should be the same, nevertheless there is a difference between the values. This difference between them was taken into account because they were used for different strains; two strain directions, major ( $a_0$ ) and minor ( $b_0$ ) strain.

Table4.3. average original dimensions (microns)

$a_0$	5068,2
$b_0$	4974,4

The Leica MZ8 stereomicroscope is mounted on a stand with a gliding stage that can be quickly moved in any direction. A coaxial incident illuminator fits between the optics carrier and the phototube. The ring illuminator is used for the shadow-free illumination of spatial objects.



Fig.4.15. Leica MZ8 stereomicroscope

**Table 4.4. Technical details for Stereo microscope Leica MZ8**

Objective lenses	Plan 1x
Oculars	10x/21B (2x)
Zoom	continuous with marked positions
Maximum magnification	50 x
Image output	a JVC Camera KY-F550E can be mounted and connected to a pc with Leica Qwin software image acquiring possibilities
Use	Research

Using the norm, the sample strain has been measured by measuring the strain of 24 circles, with the following distribution. Three strain lines perpendicular to the crack have been defined and afterwards 8 circles of each line have been taken, 4 circles in each side of the crack.

The first step was to cut the interesting part of the tested sample. As this part was deformed by a dome, it was not flat, thus the real distances were different from the measured ones with the microscope. To take into account this difference, basic trigonometric equation was used:

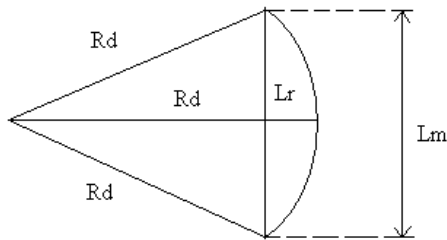
$$L_{real} = 2 * \left( \arcsen \left( \frac{L_{measured}}{2 * R_{dome}} \right) \right) * R_{dome} \quad (4.1)$$

Where:

$L_{real}$  ( $L_r$ ): real distance

$L_{measured}$  ( $L_m$ ): measured distance

$R_{dome}$  ( $R_d$ ): Dome radius = 50 mm

**Fig.4.16. Representative figure of the calculations**

The engineering strain of each small circle has been calculated using the basic deformation equations:

$$e = \frac{(L_{real} - L_{original})}{L_{original}} \quad (4.2)$$

$L_{original}$  takes the value of  $a_0$  or  $b_0$  depending on the engineering strain that is being calculated (major or minor strain).

On the other hand, for the true strain, the following equation was used:

$$\epsilon_{ps} = \ln(e + 1) \quad (4.3)$$

After all the calculations, the strain of each line is obtained. In order to obtain the crack position, a parabola fit is required. This parabola fit is obtained by minimizing the error between the strain obtained before and a theoretical one. The parabola equation is

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.4)$$

Where a, b and c are constant, y is the true strain and x is the distance from the crack.

Examples of these calculations will be shown below

#### 4.2.1. DC01

Fig.4.17 represents the strain on line 2 of the sample number 18 (equibiaxial state) as an example of the calculations. This, as I it has been explained, has been done for three different lines of each sample. This figure shows the strain measured in both directions of the plane, that is, major and minor strain and their corresponding parabola fit. It can be seen how close the major strain curve and the minor strain curve are to each other. That indicates that the equibiaxial state was reached.

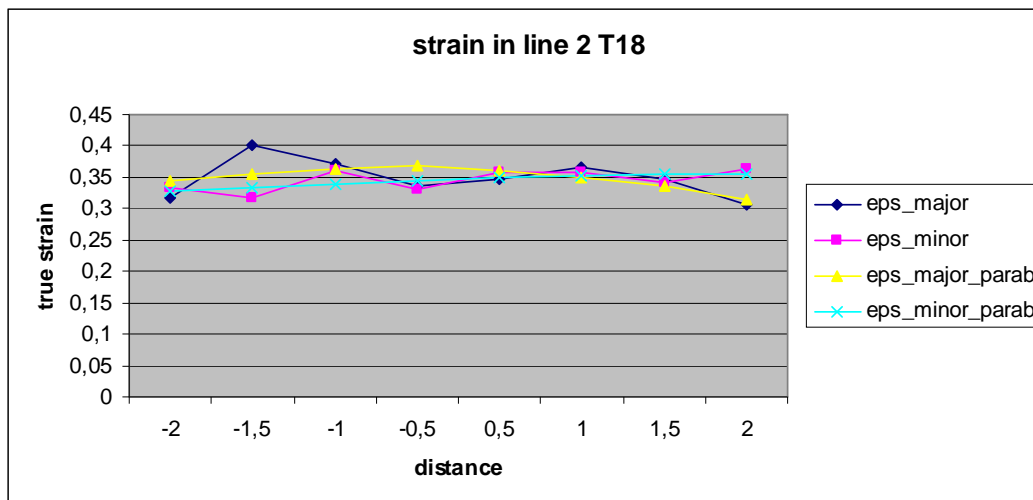
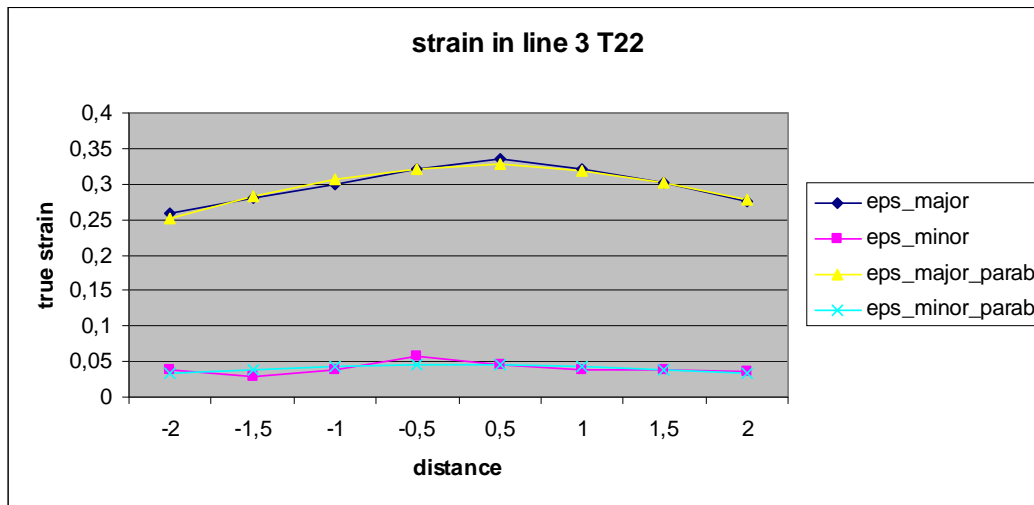


Fig.4.17. Strain on line 2 of the test 18

Fig.4.18. represents the strain on line 3 of the sample number 22 as an example of the calculations. As the figure above, this figure represents the strain on both directions, that is, major and minor strain and the corresponding parabola fit of each one. In this case, the reader can see how close is the minor strain to 0, which means, how close we are to the plane strain state.

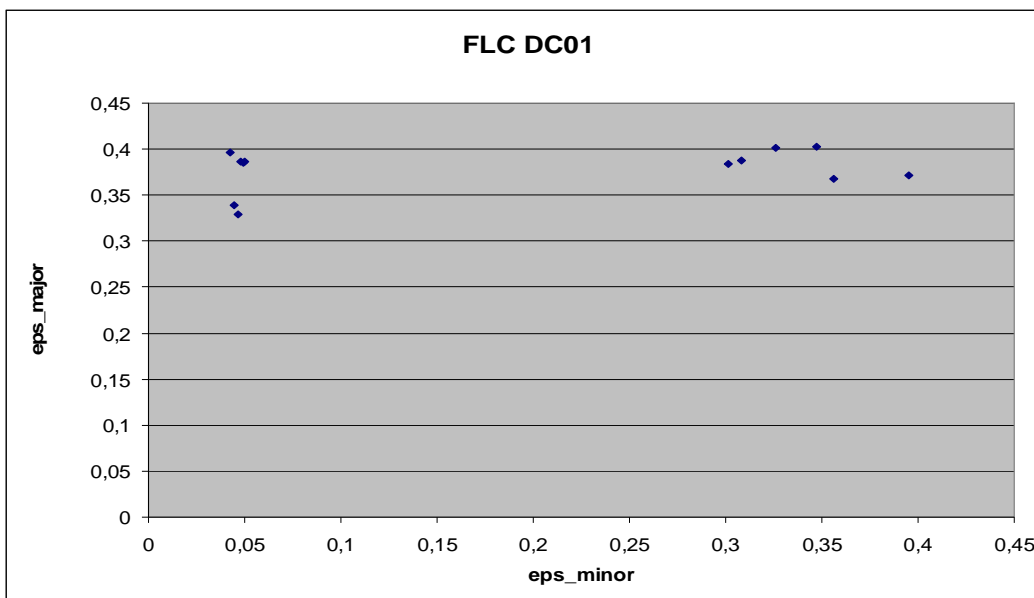




**Fig.4.18. Strain on line 3 of the test 22**

Once the strain of each line of each sample is calculated, with the fit with the parabola, the point where the strain reaches the maximum value can be obtained. This highest strain point is where the crack occurs. If we take the crack point of each line we can draw the FLC (forming limit curve) of each tested sample.

If the points of each sample are brought together, the FLC of DC01 is obtained. Fig.4.19 represents the FLC of the material DC01.



**Fig.4.19. FLC of DC01**

The points that give the figure above can be seen on Table4.5.

**Table4.5. Points that give the DC01 FLC**

Tested sample	Line	Major strain	Minor strain
<b>18</b>	Line 1	0,40	0,35
	Line 2	0,37	0,36
	Line 3	0,37	0,40
<b>19</b>	Line 1	0,38	0,30
	Line 2	0,39	0,31
	Line 3	0,40	0,33
<b>22</b>	Line 1	0,40	0,04
	Line 2	0,34	0,04
	Line 3	0,33	0,05
<b>23</b>	Line 1	0,39	0,05
	Line 2	0,39	0,05
	Line 3	0,39	0,05

#### 4.2.2. DC06

The same calculations have been done for the samples of the steel DC06.

Fig.4.20 represents the strain on line 2 of the sample number 33 (equibiaxial state) as an example. This figure shows the strain measured in both directions of the plane, that is, major and minor strain and their corresponding parabola fit. It can be seen how close the major strain curve and the minor strain curve are to each other. That indicates that the equibiaxial state was reached.

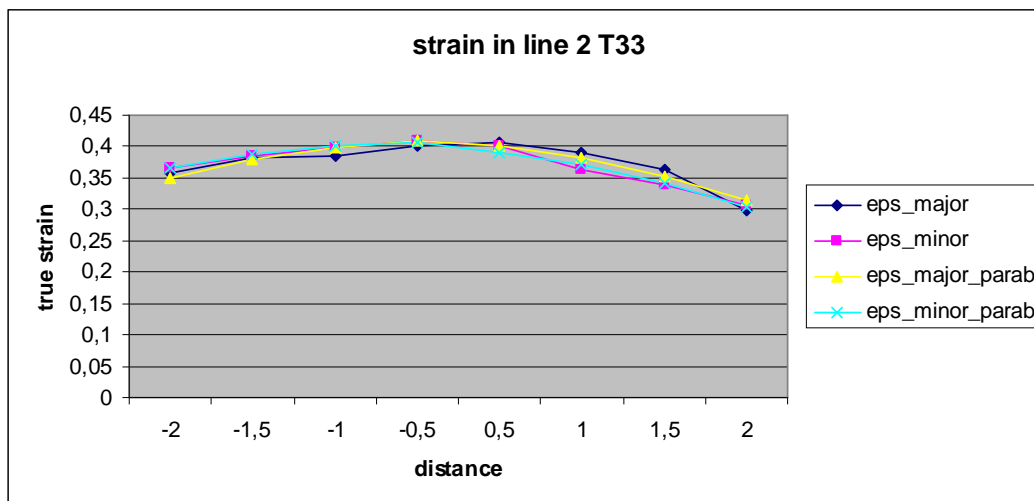
**Fig.4.20. Strain on line 2 of the test 18**

Fig.4.21 represents the strain on line 1 of the sample number 37 as an example. As the figure above, this figure represents the strain on both directions, that is, major and minor strain and the corresponding parabola fit of each one. In this case, the reader can see how close is the minor strain to 0, which means, how close we are to the plane strain state. If this case is compared to the DC01 plane strain case (figure), it can be seen that in DC01 the plane strain state is closer than in DC06, because in DC01 the minor strain is almost zero whereas in DC06 is not that closer.

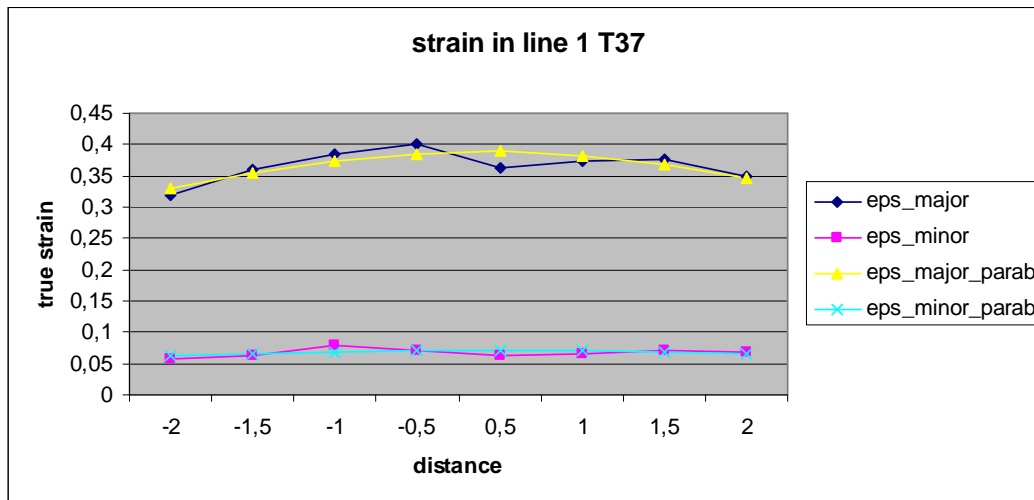


Fig.4.21. Strain on line 1 of the test 37

As in the case of DC01, once all the calculations are done, and the parabola fit is done as well, it can be obtained the highest strain point, that is, the point where the crack occurs. If all these points are brought together, the FLC of each tested sample is obtained.

If all these FL curves are brought together the Fig.4.22 is obtained. This figure represents the FLC for the steel DC06

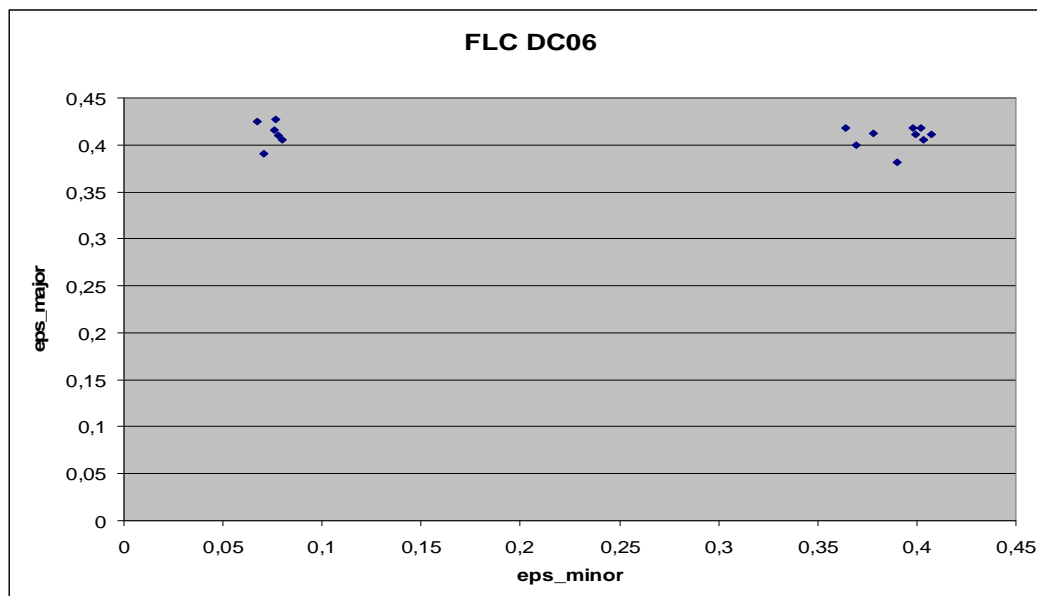


Fig.4.22. FLC DC06

The points that give the figure above can be seen in Table4.6.

Table 4.6. Points that give the DC06 FLC

Tested sample	Line	Major strain	Minor strain
33	Line 1	0,38	0,39
	Line 2	0,41	0,41
	Line 3	0,41	0,40
34	Line 1	0,40	0,37
	Line 2	0,41	0,38
	Line 3	0,42	0,36
35	Line 1	0,41	0,40
	Line 2	0,42	0,40
	Line 3	0,42	0,40
36	Line 1	0,42	0,08
	Line 2	0,43	0,08
	Line 3	0,42	0,07
37	Line 1	0,39	0,07
	Line 2	0,41	0,08
	Line 3	0,41	0,08

### 4.3. CONCLUSION

The typical forming limit curve for steel can be seen below in Fig.4.23. As this figure shows, in plane strain state (minor strain equal to zero), the minimum value of major strain is reached. The highest values of major strain are reached when the minor strain is negative, that is, in the left hand of the FLC diagram. As it can be seen on the experimental results, the plane strain state almost fit with the FLC curve for steel. However, for the equibiaxial state, our results of major strain are almost the same as in the plane strain state while the value in the equibiaxial strain should be higher. That occurs in both steels.

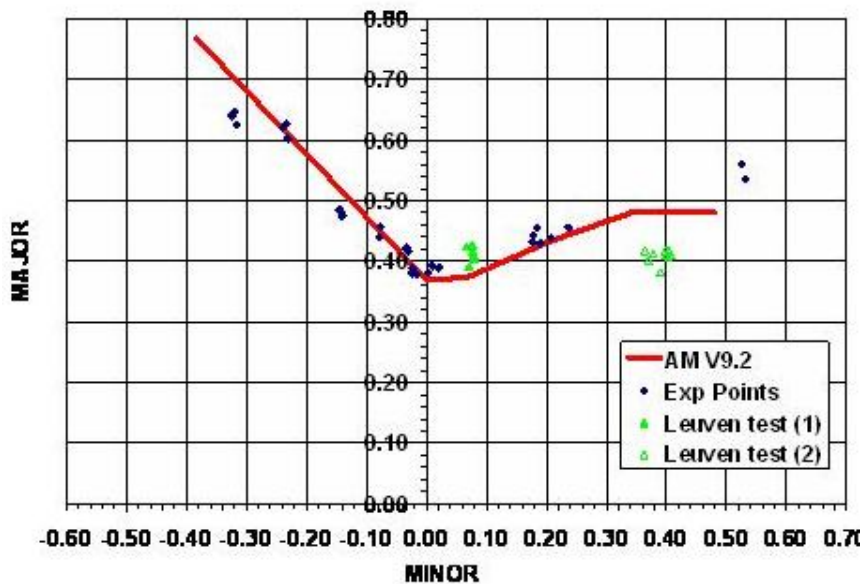


Fig.4.23. Typical FL curve for DC06, from [Ref]

The green points are the results obtained with the method that we have applied in the university, and the blue points (Private Communication by Arcelor Mittal) are the ones obtained by the suppliers. As it can be seen, the plane strain state is really close to the predicted by the suppliers, but the equibiaxial state departs considerably from the predicted one.

Some reasons to explain that phenomenon can be problems of friction that lead to an early fracture of the sample or draw in due to a low initial pressure or a combination of both reasons. The tests were done with the best lubrication conditions; however it is impossible to insure the total absence of friction. The friction increases the forces on the sample that produce an early fracture of the sample. If at the same time, the sample is not strongly clamped, draw in may occur due to the fact that the sample slips.

## 5. SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING

### 5.1. METHOD

In the SPIF process generic, freeform shapes can be produced using a standard, spherical, CNC controlled tool. The process starts from a flat sheet metal blank, clamped on a sufficiently stiff rig and mounted on the table of a CNC machine. To form a part, the machine tool follows a pre-programmed contour, similar to a conventional milling operation. The main advantage of this method is that no die is required, making this an ideal process for rapid prototyping or small batch production.

In Fig.5.1 a picture of the machine used in SPIF is shown.



Fig.5.1. Aciera F45 picture

For the SPIF samples ACIERA F45 CNC 4-axis milling machine (Work area 230x 230 mm<sup>2</sup>.) has been used.

## 5.2. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

### 5.2.1. THICKNESS MEASUREMENT

The cones have been made on the ACIERA machine. Afterwards, two pieces of each cone have been cut, one on the rolling direction and another one on the transversal direction. Figures of the sample shape for the thickness measurement will be seen below. The thickness distribution within the wall has been measured with a micrometer and plotted together on the same graph.

The sample preparation process is as follows:

1. The samples were cut so that one side of the sample is the rolling direction or the transversal direction, obtaining thus, two samples from each cone as it can be seen in Fig.5.2.
2. The samples were polished to remove the rough edges caused by the cutting.
3. A strip of millimetre paper was stuck on the polished side.

4. Using the micrometer the thickness was measured every 2,5 mm.

#### SINE LAW

The Sine law has been explained in the introduction, and as a summary of this law it can be said, that the Sine law predict the final thickness of a specimen after a SPIF process. The equation of this law is:

$$t_f = t_o * \sin(90 - \alpha) \quad (5.1)$$

Where  $t_f$  is the final thickness,  $t_o$  the original thickness and  $\alpha$  is the wall angle of the specimen.

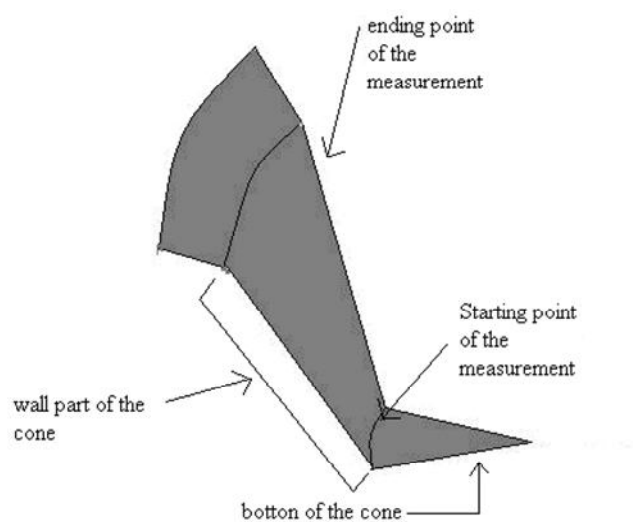
As it can be seen, this law only depends on the initial thickness of the sheet and the wall angle of the cone.

In Fig.5.2 pictures of a cone once the samples were cut can be seen.



**Fig.5.2. Picture of one cone once the samples for thickness were cut**

In Fig.5.3, a representation of the piece shape can be seen, as an indication of the starting and ending point of the measurement in all materials.



**Fig.5.3. Representation of the piece's shape for the thickness measurement with aluminium**

In Fig.5.4 a picture of the cut samples can be seen.



Fig.5.4. Picture of the sample for the thickness measurement

### 5.2.1.1. ALUMINIUM EXPERIMENTAL RESULTS

Two cones with the same thickness have been tested on the ACIERA with the same tool diameter but with different wall angle,  $72^\circ$  and  $75^\circ$ . In Table5.1, the details of these tests can be seen. For this material, these two wall angle cones have been chosen because the limiting wall angle for this material is  $76^\circ$  as it has been studied before.

Table5.1. Aluminium cones details

Cone	Thickness	Wall angle	Tool diameter
S07	1.50 mm.	$72^\circ$	10 mm.
S09	1.50 mm.	$75^\circ$	10 mm.

The results of these measurements have been plotted on the same graph in order to see if there is a difference in the thickness distribution between the rolling and the transversal direction. In Fig.5.5 is shown the thickness distribution of the first cone, that is, wall angle  $72^\circ$ . In the same figure (Fig.5.5), it is shown, as well, the Sine law prediction of the final thickness. As it can be seen, the predicted thickness fit almost with the measured one.

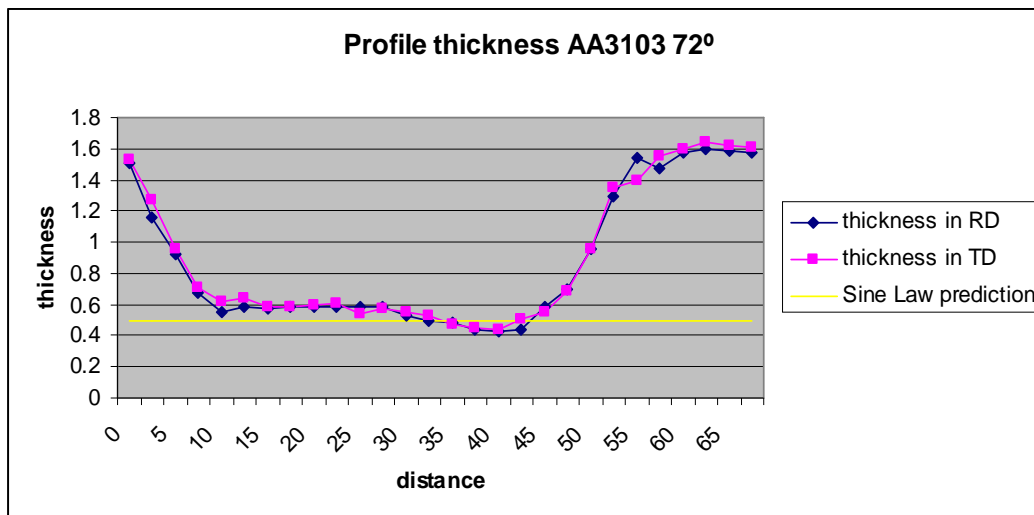


Fig.5.5. Thickness profile for the sample with  $72^\circ$  wall angle



In Fig.5.6 the thickness profile of the sample with 75° wall angle can be seen. As in Fig.5.5, the Sine law thickness prediction is shown as well.

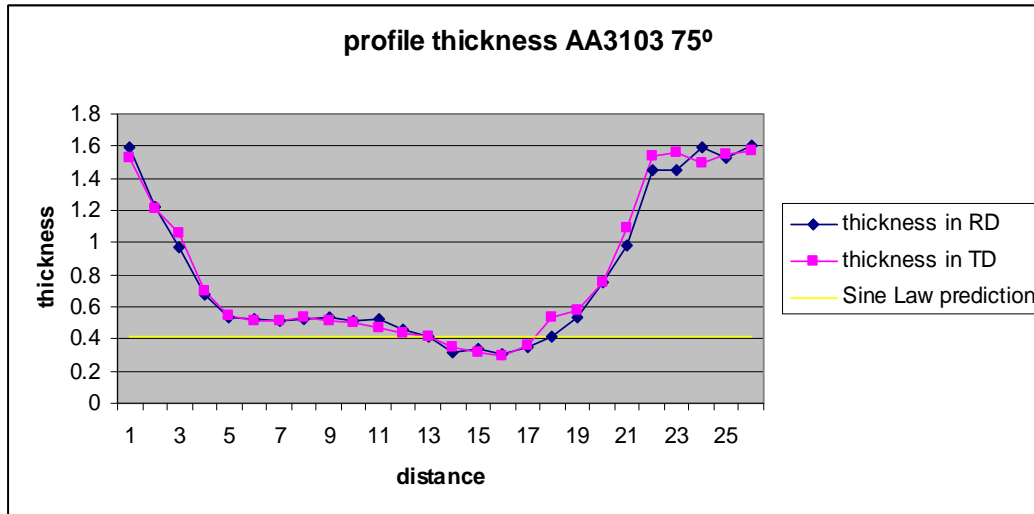


Fig.5.6. Thickness profile for the sample with 75° wall angle

#### 5.2.1.2. DC01 EXPERIMENTAL RESULTS

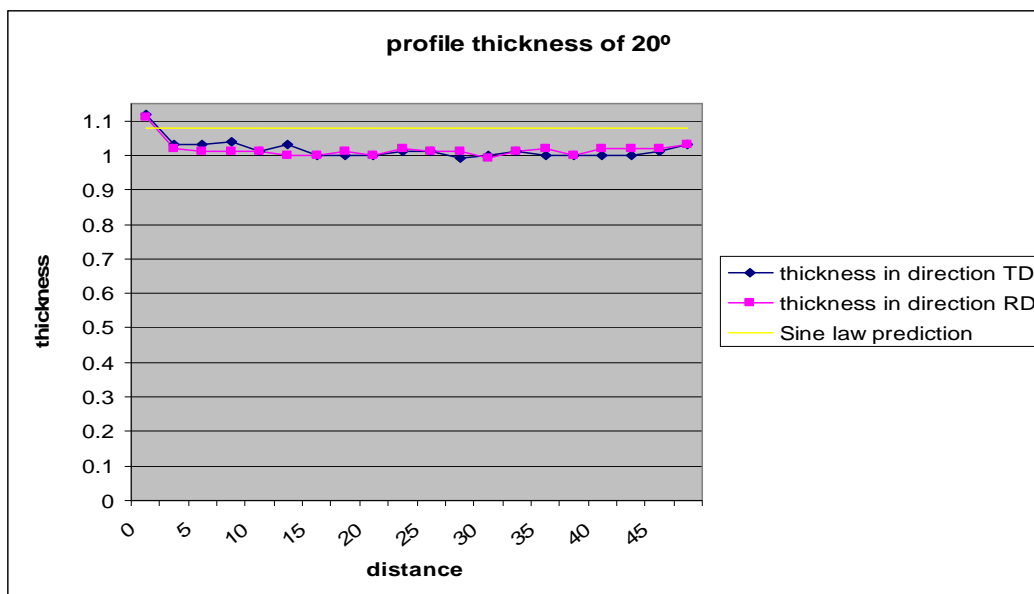
Ten cones with different wall angles have been measured. The sample thickness and the tool diameter were the same in all tests. Table5.2. shows the cones details.

Table5.2. DC01 cones details

Sample	Wall angle	thickness	Tool diameter (mm)
Cone 10	10°	1,15	10
Cone 11	20°	1,15	10
Cone 12	30°	1,15	10
Cone 13	40°	1,15	10
Cone 14	50°	1,15	10
Cone 15	55°	1,15	10
Cone 16	60°	1,15	10
Cone 17	65°	1,15	10
Cone 18	66°	1,15	10
Cone 19	67°	1,15	10

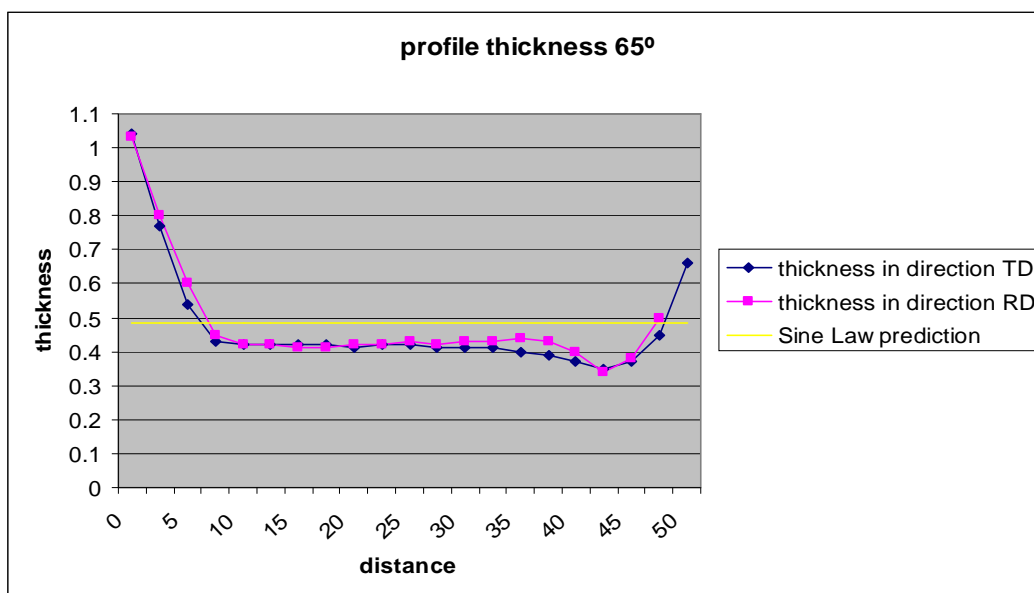
The biggest wall angle tested was 67° because the previous studies have proved that the limiting wall angle for DC01 is 68° (fractured cone)

In Fig.5.7 the thickness profile of the 20° wall angle cone can be seen.



**Fig.5.7. Thickness profile for the sample DC01 with 20° wall angle**

In Fig.5.8 the thickness profile of the 65° wall angle cone can be seen.



**Fig.5.8. Thickness profile for the sample DC01 with 65° wall angle**

In Fig.5.9 the thickness profile of the 67° wall angle cone can be seen.

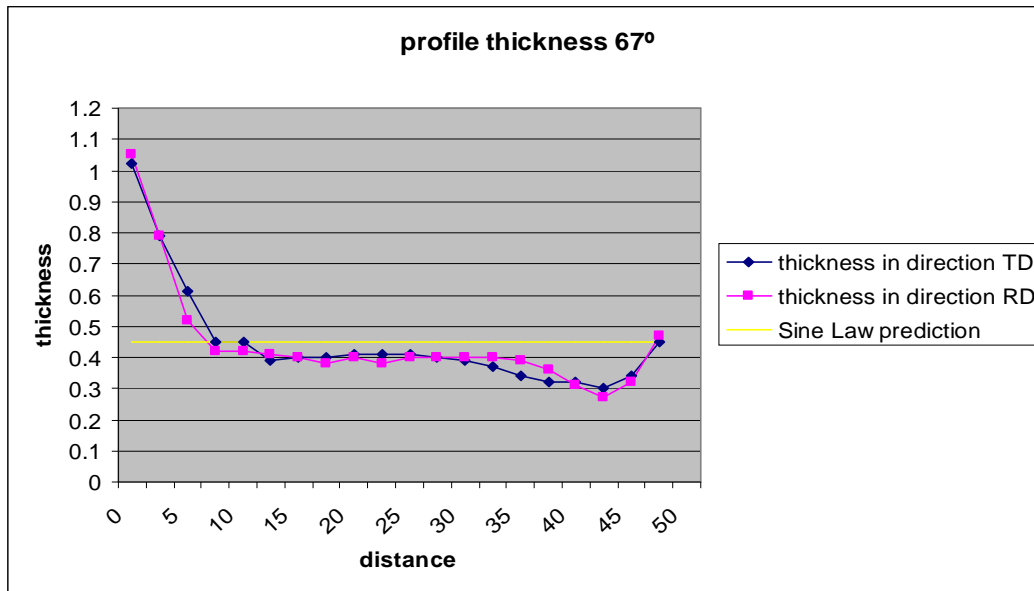


Fig.5.9. Thickness profile for the sample DC01 with 67° wall angle

The thickness distribution for all the different wall angles can be found in the first appendix (A.1.) at the end of this document.

### 5.2.1.3. DC06 EXPERIMENTAL RESULTS

Ten cones with different wall angles have been measured. The sample thickness and the tool diameter were the same in all tests. Table5.3. shows the cones details.

Table5.3. DC06 cones details

Sample	Wall angle	Thickness	Tool diameter (mm)
Cone 20	10°	0.85	10
Cone 21	20°	0.85	10
Cone 22	30°	0.85	10
Cone 23	40°	0.85	10
Cone 24	50°	0.85	10
Cone 25	55°	0.85	10
Cone 26	60°	0.85	10
Cone 27	65°	0.85	10
Cone 28	66°	0.85	10
Cone 29	67°	0.85	10

The limiting wall angle for this material has not been studied before. Because of that, the samples were tested until fracture and that occurs at 67°, which means that the limiting wall angle is 66°. This result is not very accurate because only one test has been done, and the statistics were not taken into account

In Fig.5.10 the thickness profile of the 10° wall angle cone can be seen.

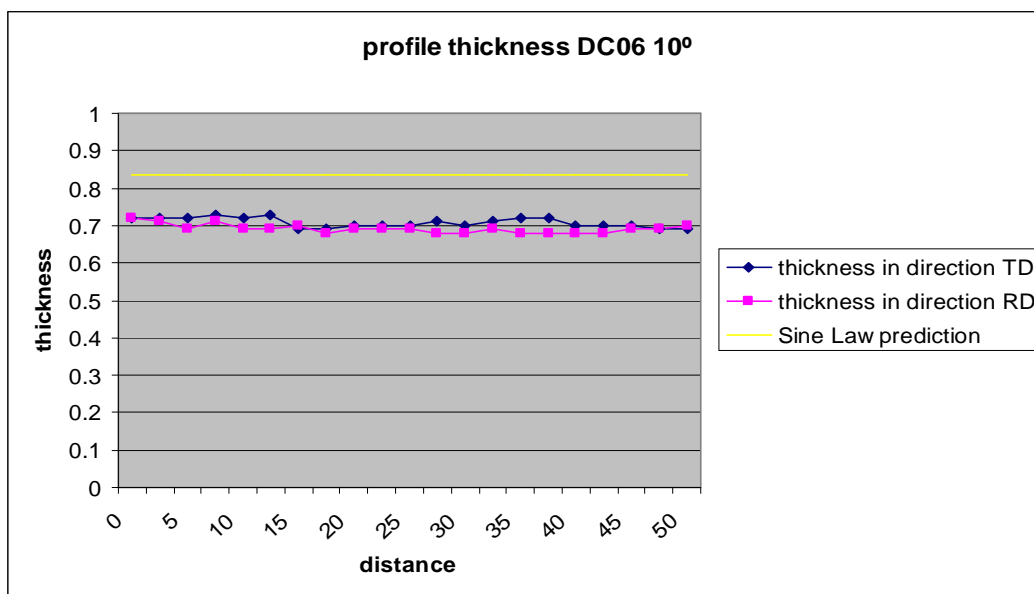


Fig.5.10. Thickness profile for the sample DC06 with 10° wall angle

In Fig.5.11 the thickness profile of the 55° wall angle cone can be seen.

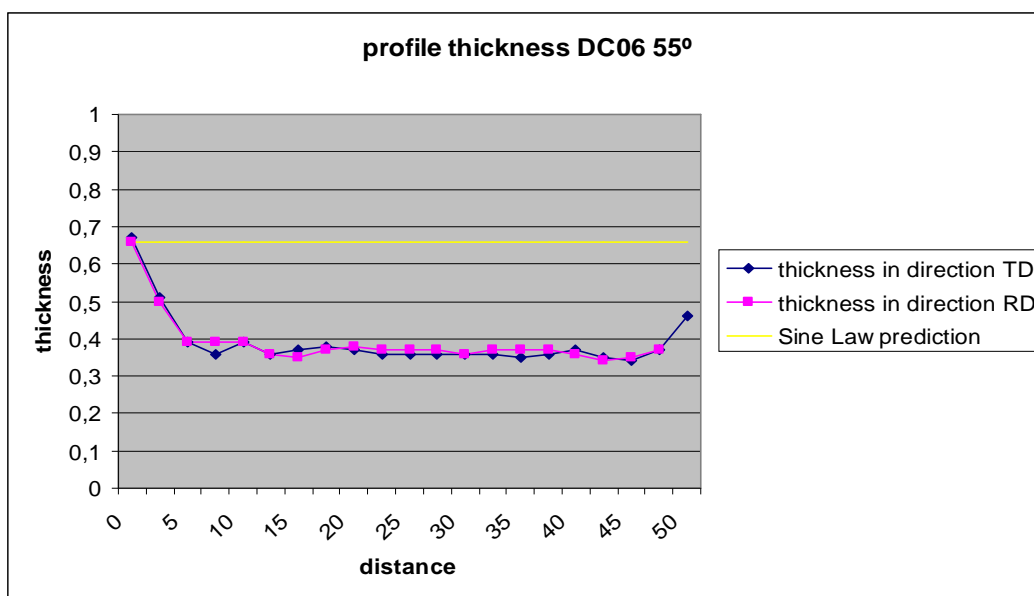
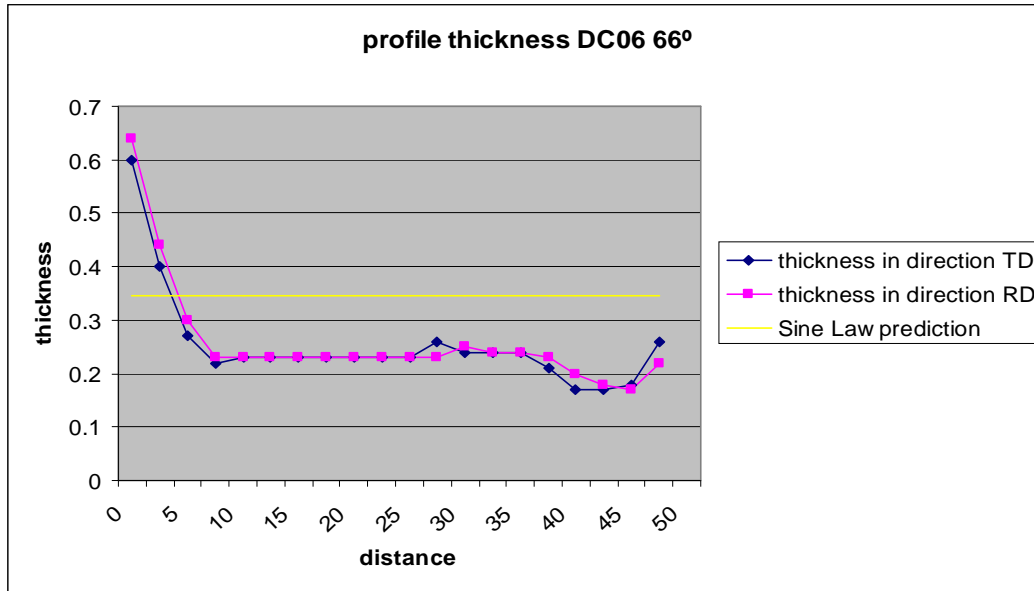


Fig.5.11. Thickness profile for the sample DC06 with 55° wall angle

In Fig.5.12 the thickness profile of the 66° wall angle cone can be seen.



**Fig.5.12. Thickness profile for the sample DC06 with 66° wall angle**

The thickness distribution for all the different wall angles can be found in the first appendix (A.1.) at the end of this document.

#### 5.2.1.4. CONCLUSIONS FOR THE THICKNESS MEASUREMENT

From this analysis, it can be concluded that for the three materials there is no influence of the measurement direction (rolling or transversal direction) on the thickness profile. This conclusion can be clearly seen on all the figures above, because it is clear how the points in both directions are almost superposed without an evident difference between the rolling and the transversal direction. The thickness distribution is almost the same in both directions, and the small differences that are seen can be attributed to the lack of accuracy of the method since the measurements were done manually.

Another conclusion that has to be mentioned is that the thickness predicted by the use of the Sine Law fit with the measured one in the case of the aluminium.

In the DC01 case the Sine Law thickness prediction is always bigger than the smallest thickness measured, but the difference in all wall angle cases is almost the same and very small, and it can be said that the thickness predicted with the Sine law is a good approximation of the final thickness of the specimen.

Another important point to mention is that in the cases of 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, and 55° wall angle DC01 cones the thickness decreases at the beginning but along the wall cone remains constant. However, in the cases of 60°, 65°, 66°, and 67° DC01 cones there is a further decrease of the thickness that leads to a thickness that departs considerably from the predicted one. This part where the thickness decreases is localised at the beginning of the wall cone. The greater the wall angle the greater the decrease on thickness.

In the DC06 case the Sine Law thickness prediction is always bigger than the smallest thickness measured as in DC01 case, but the difference in all wall angle cases is almost the same and small, and it can be said that the thickness predicted with the Sine law is a good approximation of the final thickness if this predicted thickness is

taken as an average of the thickness within the wall cone. However, the difference between the predicted thickness and the measured one in DC06 is bigger than the difference between the predicted and measured thickness in DC01.

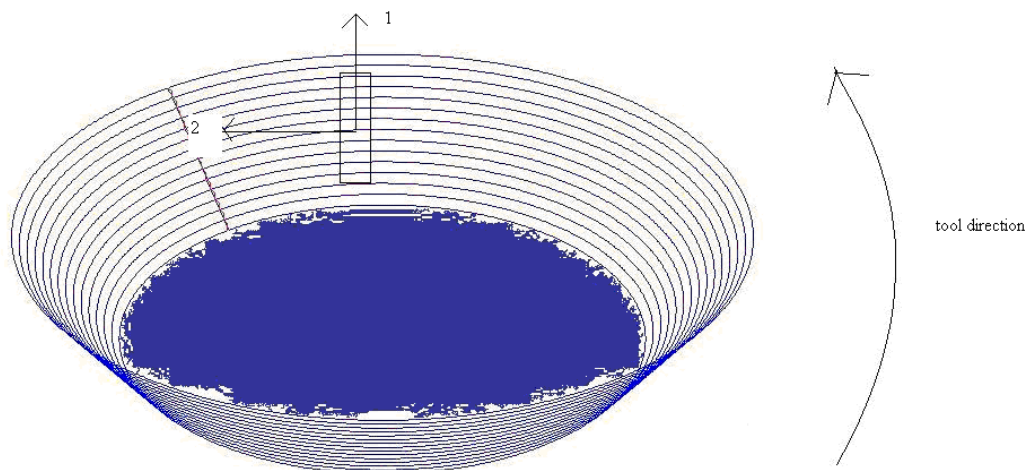
As in DC01, the cases of 10°, 20°, 30°, 40°, and 50° wall angle DC06 cones, the thickness decreases at the beginning but along the wall cone remains constant. However, in the cases of 55°, 60°, 65°, 66°, and 67 ° there is a further decrease of the thickness that leads to a thickness that departs considerably from the predicted one. The greater the wall angle the greater the decrease in the thickness.

### 5.2.2. SHEAR ANGLE MEASUREMENT

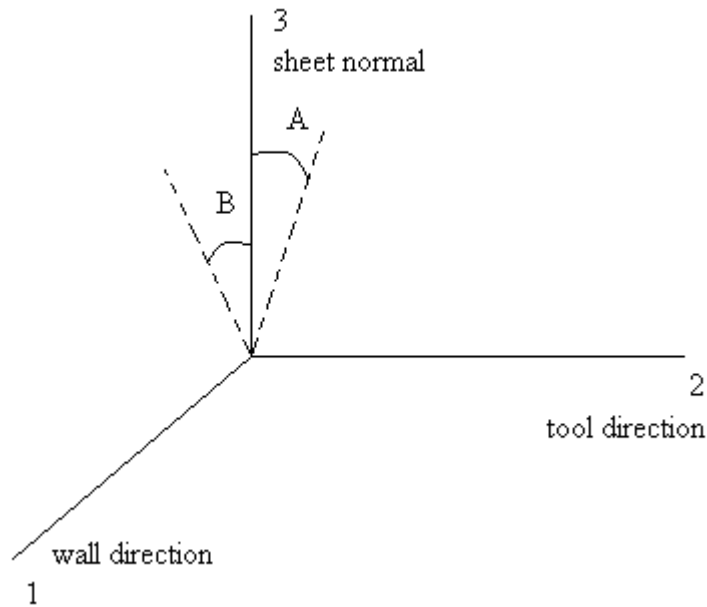
The cones have been done with the ACIERA machine, changing parameters as wall angle, tool diameter, and the thickness of the sample in order to obtain the influence of these parameters on the shear angle. To measure the shear angle, small holes (0.4 mm. of diameter) have been drilled in the samples before the tests. Afterwards, with the Stereo microscope Leica MZ8 and the goniometer I have looked through the hole and tried to obtain two different angles:

Angle A: in plane of tool direction and sheet normal

Angle B: in plane of radial direction (wall direction) and sheet normal



**Fig.5.13. picture of the cone**



**Fig.5.14. Representation of the angles A and B**

#### 5.2.2.1. METHOD

Once the tests on the ACIERA were done, parts including the small holes done as it has been explained above were cut with the EDM machine, cutting with wire spark erosion, that is, without forces in order to avoid damages on the samples.

#### GONIOMETER



**Fig.5.15. Picture of the goniometer**

The goniometer allows the following rotations:

- Around an axis normal to the goniometer basis
- “theta”: rotation of the Euler cradle.
- “2(theta): rotation of the detector, independent from “theta”.
- A rotation of the sample around the normal to its surface

- A rotation of the sample around an axis which is the intersection between its own surface and the plane of the “ $2(\theta)$ ”-angle. This rotation moves the normal to the sample surface out of the plane of the “ $2(\theta)$ ”-angle

#### MICROSCOPE LEICA MZ8

Some technical details can be read on Table 5.4. For the measurements the Leica image processing and analysis system Qwin has been used. Using the mentioned program it has been possible to obtain the distance between two points of a picture taken with the microscope and it has been possible as well to obtain the value of a drawn area.

The Leica MZ8 stereomicroscope is mounted on a stand with a gliding stage that can be quickly moved in any direction. A coaxial incident illuminator fits between the optics carrier and the phototube. The ring illuminator is used for the shadow-free illumination of spatial objects.

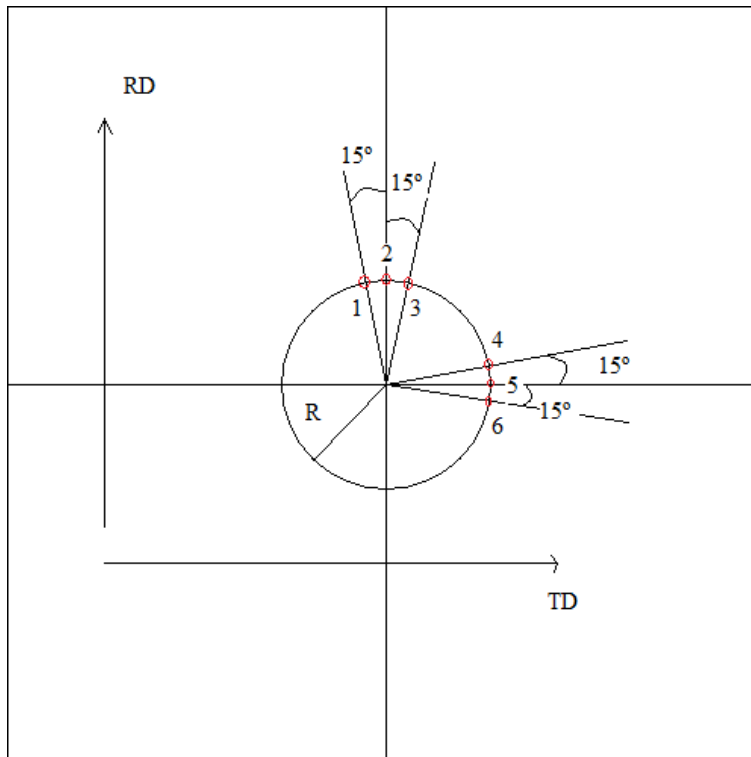
**Table 5.4. Technical details for Stereo microscope Leica MZ8**

Objective lenses	Plan 1x
Oculars	10x/21B (2x)
Zoom	continuous with marked positions
Maximum magnification	50 x
Image output	a JVC Camera KY-F550E can be mounted and connected to a pc with Leica Qwin software image acquiring possibilities
Use	Research

#### MEASUREMENT

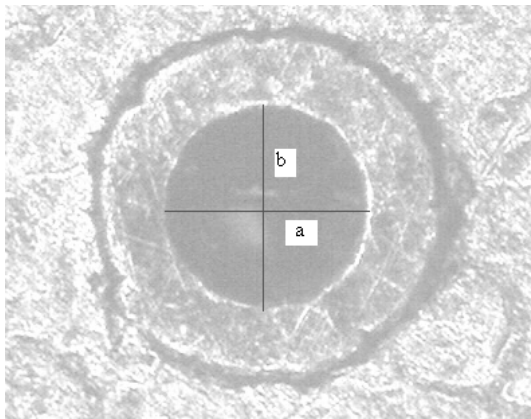
The holes were made so that three of them were in the rolling direction and the other three were in the transversal direction. Thus, after cutting, 6 different pieces were obtained containing the holes, three in the rolling direction and three in the transversal direction from each cone. This can be seen in Fig. 5.16.





**Fig.5.16. Representation of the position of the drilled holes**

In Fig.5.17, an example of the hole that has been done on the samples can be seen. In the same figure (Fig.5.17), the reader can see as well, the distances that have been measured and afterwards used in the calculation of the strains.



**Fig.5.17. Picture of the hole**

The original dimension of the circular hole was 0.4 mm. as diameter.

Besides the angles, the volume increase and the strain of each hole have been measured in order to see if this method is giving us a good result of the material behaviour or otherwise it is introducing stress concentration and changing the material properties. When the volume increase is not very big and the strains calculated from holes give a fairly good estimate of the strains obtained in another, more reliable way, it can be concluded that the presence of the hole itself does not change the process much.

The calculations were as following:

With the microscope and the program explained above, the surface area of the hole on each side (outside and inside the cone) was measured. Each area was measured in two different ways. One way was to measure the two axis of the ellipse, and calculate the area of the ellipse with the formula known for that, that is:

$$A = \frac{\Pi * a * b}{4} \quad (5.2)$$

Where  $a$  is the major axis of the ellipse and  $b$  is the minor axis of the ellipse and they were measured with the microscope. Two different areas were gotten,  $A_1$  and  $A_2$ , where  $A_1$  correspond to the large surface and  $A_2$  correspond to the small surface.

The second way was to measure the area directly with the microscope. The results were compared for both ways and the ratio between them was almost 1, thus, it was concluded that both methods were valid for the area measurement.

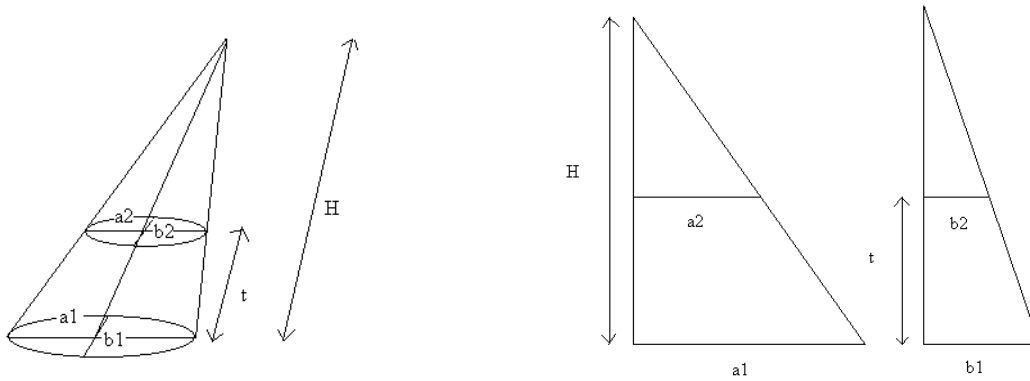
Once the area of each surface was gotten, the next step was to measure the volume of the hole. For that, the calculations were:

$$V_1 = \frac{1}{3} * H * A_1 \quad (5.3)$$

$$V_2 = (H - t) * \frac{1}{3} * A_2 \quad (5.4)$$

$$V = V_1 - V_2 \quad (5.5)$$

Where  $V_1$  is the volume of the large cone,  $V_2$  is the volume of the small cone;  $t$  is the thickness of the cut piece and  $H$  the height of the cylinder. In Fig.5.18 a representative figure of the calculations is shown.



**Fig.5.18. Representative figure of the strain calculations**

From the equations above, the resulting equations to calculate  $H$  are:

$$H = \frac{\frac{a_1}{a_2} * t}{\frac{a_1}{a_2} - 1} \quad (5.6)$$

$$H = \frac{\frac{b_1}{b_2} * t}{\frac{b_1}{b_2} - 1} \quad (5.7)$$

For the strain measurement of the holes the measurements were as following:

For the engineering strain the used equation was:

$$e = \frac{(a_{measured} - a_{original})}{a_{original}} \quad (5.8)$$

On the other hand, for the true strain the used equation was:

$$eps = \ln(e + 1) \quad (5.9)$$

Two different engineering strains and true strains were defined. On one hand, major engineering and major true strain and on the other hand minor engineering and minor true strain. The major strains are referred to the large ellipse and its dimensions and the minor strains are referred to the small ellipse and its dimensions.

With the equation explained above, the strain in two directions is obtained; nevertheless there is a third strain (in the thickness direction) that has to be obtained. For that, the volume conservation law will be used, leading to the following equations:

$$V_{final} = V_{original} \quad (5.10)$$

$$l_1 * l_2 * l_3 = l_1^0 * l_2^0 * l_3^0 \quad (5.11)$$

$$\ln\left(\frac{l_1}{l_1^0} * \frac{l_2}{l_2^0} * \frac{l_3}{l_3^0}\right) = \ln(1) \quad (5.12)$$

$$\ln\left(\frac{l_1}{l_1^0}\right) + \ln\left(\frac{l_2}{l_2^0}\right) + \ln\left(\frac{l_3}{l_3^0}\right) = 0 \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_{major} + \varepsilon_{min or} = -\varepsilon_{thickness} \quad (5.15)$$

All these calculations are made for the inside and the outside ellipse of each sample.

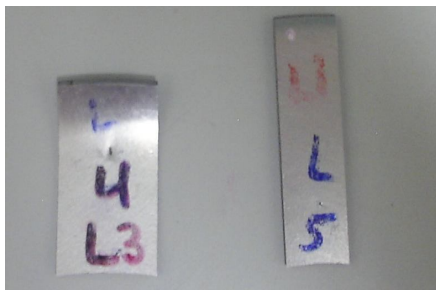
### 5.2.2.2. ALUMINIUM EXPERIMENTAL RESULTS

Description of each cone parameters can be seen on Table5.5.

**Table5.5. Aluminium cones details for shear measurement**

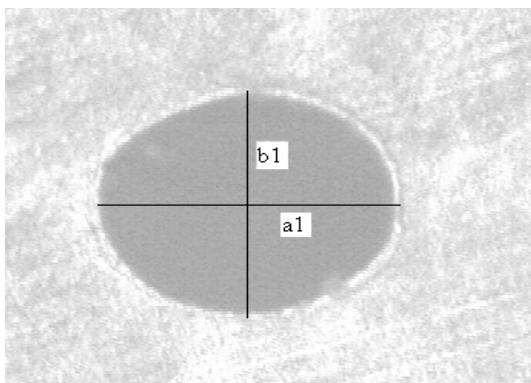
Cone	Thickness	Wall angle	Tool diameter (mm.)
1	1,15	20°	10
2	1,15	60°	10
3	1,15	20°	25
4	1,15	60°	25
5	1,50	20°	10
6	1,50	60°	10
7	1,50	20°	25
8	1,50	60°	25
9	1.50	50°	10

In Fig.5.19., an example of the cut pieces can be seen

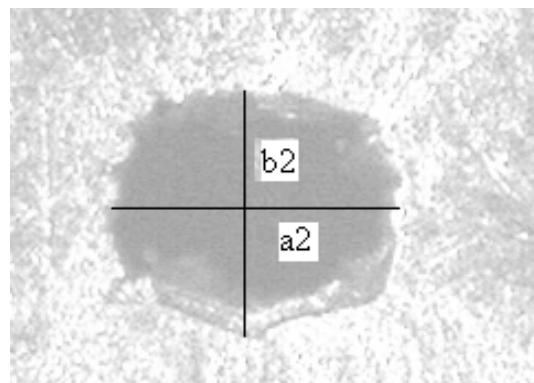


**Fig.5.19. Cut pieces for shear measurement**

In Fig.5.20, Fig.5.21, Fig.5.22 and Fig.5.23 two holes seen with the microscope after the SPIF process are shown, one is on the outside surface cone and the other one is on the inside surface cone of the same sample. It can be appreciated how the holes are bigger compared with the original ones.



**Fig.5.20. Piece of Cone 7 in the RD outer surface**



**Fig.5.21. Piece of cone 7 in the RD inner surface**

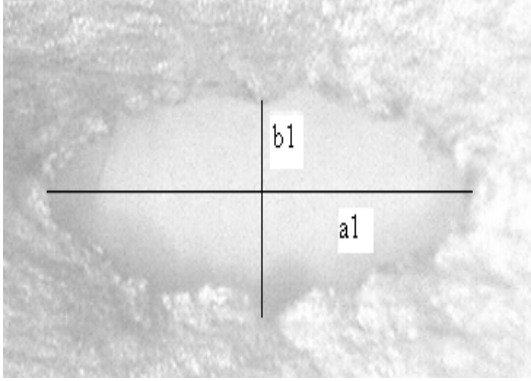


Fig.5.22. Piece of cone 8 in the RD outer surface

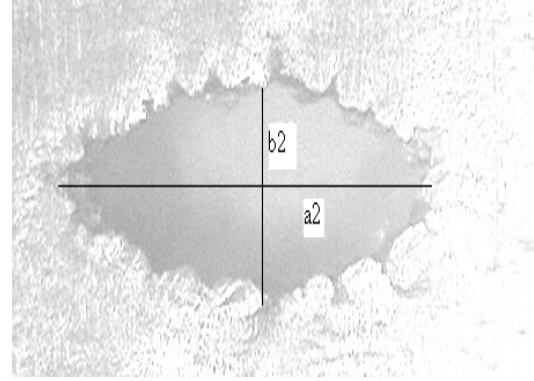


Fig.5.23. Piece of cone 8 in the RD inner surface

In Table5.6, the results of all the calculations explained above can be seen:

Table5.6. Calculation results for shear

Cone	Volume increase	OUTSIDE				INSIDE			
		$\epsilon_{\text{major}}$	$\epsilon_{\text{minor}}$	$\epsilon_{\text{thick}}$	$\epsilon_{\text{Sine}}$	$\epsilon_{\text{max}}$	$\epsilon_{\text{min}}$	$\epsilon_{\text{thick}}$	$\epsilon_{\text{Sine}}$
Cone 1	-5.71%	0.35	0.16	-0.51	-0.06	-0.25	-0.44	0.69	-0.06
Cone 2	277.22%	1.61	0.43	-2.05	-0.69	1.54	0.36	-1.90	-0.69
Cone 3	2.50%	0.21	0.12	-0.34	-0.06	-0.08	-0.17	0.24	-0.06
Cone 4	476.29%	1.06	0.40	-1.47	-0.69	1.09	0.56	-1.65	-0.69
Cone 5	-46.85%	0.15	-0.15	0.00	-0.06	-0.64	-0.79	1.43	-0.06
Cone 6	321.11%	1.56	0.18	-1.74	-0.69	1.50	-0.01	-1.49	-0.69
Cone 7	-7.62%	0.27	0.12	-0.39	-0.06	-0.17	-0.30	0.47	-0.06
Cone 8	1176.7%	2.24	1.14	-3.39	-0.69	2.34	1.26	-3.60	-0.69
Cone 9	49.28%	1.23	0.21	-1.45	-0.44	0.28	-0.76	0.48	-0.44

Where  $\epsilon_{\text{Sine}}$  is the thickness strain predicted by the Sine law and the volume increase is the increase in volume of the hole related with the original volume.

In terms of volume increase of the holes, it can be seen that for 20° wall angle the volume remains almost constant, nevertheless for 60° wall angle the volume increase is like 4 times the original volume, hence, it can be deduced that for big wall angles this method is no more valid

In terms of strain measurement of the holes and comparing the measured strain with the Sine's strain prediction, it has been seen that for all wall angles the measured strain is much bigger than the predicted one, and it can be deduced that this method can not be used for strain measurement when big wall angles but can be used when small wall angles in order to get an approximation of the strain.

Now, the influence of the different parameters on the shear angle will be studied. For that, the cones were done changing only one parameter at each time, in order to compare the influence on the shear angle of only one parameter.

In Table5.7, the influence of the wall angle on the shear angle is shown

Table5.7. influence of the wall angle on the shear angle. Average shear angles.

				Rolling direction		Transversal direction	
Wall angle	Cone	Tool diameter (mm.)	Thickness (mm.)	Angle A	Angle B	Angle A	Angle B
20°	Cone 1	10	1.15	6°	-6°50'	7°	-5°50'
	Cone 3	25	1.15	4°	8°	4°20'	-6°
	Cone 5	10	1.50	-1°50'	1°40'	30'	2°40'
	Cone 7	25	1.50	-2° 30'	1° 10'	-2°	20'
60°	Cone 2	10	1.15	11°20'	9°10'	11°40'	-1°50'
	Cone 4	25	1.15	7°30'	3°30'	4°	3°20'
	Cone 6	10	1.50	19°10'	7°10'	20°30'	13°10'
	Cone 8	25	1.50	7°30'	-8° 50'	6°	-12°

As it can be seen on the table above, a bigger wall angle leads to a bigger shear angle. This can be clearly seen if two cones with different wall angle and the same thickness and the same tool diameter are compared, for example, cone 1 and cone 2 can be compared. However, even if there is a clear difference between the shear angles, a correlation between the wall angle and the shear angle is not obvious.

In Table5.8, the influence of the thickness on the shear angle is shown

Table5.8. influence of the thickness on the shear angle

				Rolling direction		Transversal direction	
Thickness (mm.)	Cone	Wall angle (°)	Tool diameter (mm.)	Angle A	Angle B	Angle A	Angle B
1.15	Cone 1	20	10	6°	-6°50'	7°	-5°50'
	Cone 2	60	10	11°20'	9°10'	11°40'	-1°50'
	Cone 3	20	25	4°	8°	4°20'	-6°
	Cone 4	60	25	7°30'	3°30'	4°	3°20'
1.50	Cone 5	20	10	-1°50'	1°40'	30'	2°40'
	Cone 6	60	10	19°10'	7°10'	20°30'	13°10'
	Cone 7	20	25	-2° 30'	1° 10'	-2°	20'
	Cone 8	60	25	7°30'	-8° 50'	6°	-12°

In this case, a difference between the shear angles can be seen, but without any evidence of a correlation between the shear angle and the thickness. When the wall angle is 20°, it looks like if a thin specimen leads to a bigger shear angle, but when the wall angle is 60°, it is the opposite case, a thin specimen leads to a smaller shear angle. This makes us think that the influence of the thickness depends on the wall angle.

In Table5.9, the influence of the tool diameter on the shear angle is shown

Table5.9. influence of the tool diameter on the shear angle

Tool diameter (mm.)	Cone	Wall angle (°)	Thickness (mm.)	Rolling direction		Transversal direction	
				Angle A	Angle B	Angle A	Angle B
10	Cone 1	20	1.15	6°	-6°50'	7°	-5°50'
	Cone 2	60	1.15	11°20'	9°10'	11°40'	-1°50'
	Cone 5	20	1.5	-1°50'	1°40'	30'	2°40'
	Cone 6	60	1.5	19°10'	7°10'	20°30'	13°10'
25	Cone 3	20	1.15	4°	8°	4°20'	-6°
	Cone 4	60	1.15	7°30'	3°30'	4°	3°20'
	Cone 7	20	1.5	-2° 30'	1° 10'	-2°	20'
	Cone 8	60	1.5	7°30'	-8° 50'	6°	-12°

In this case, the influence will depend also on the wall angle. When the wall angle is 20°, it can be said that there is almost no influence on the shear angle, because this ones, are quite similar with different tool diameters. Nevertheless, when the wall angle is 60° the difference between the shear angles is more obvious but without an evident correlation between them.

All the values showed in the graphs above are averages of the measured values. All these values in more details can be found in the appendix (A.2.) at the end of this document. In this same appendix, the reader can find as well the standard deviation of these values and can see that the standard deviation only varies between 1 and 3, which proves a repeatability of the measurement quite regular.

For the last cone (50° wall angle), 7 pieces were cut but without difference between the rolling direction and the transversal direction because the rolling direction was unknown. Thus, in this case, angle A and angle B were measured without taking into account the rolling direction and for that reason no averages of the shear angles were done.

In Table5.10, the results of the measurements explained above are shown.

Table5.10. Shear angles for 50° wall angle

Cone 9, 50° wall angle	Angle A	Angle B
Piece 1	28°	40'
Piece 2	24°	1°
Piece 3	24° 40'	1° 40'
Piece 4	25° 20'	1° 20'
Piece 5	24° 40'	0°
Piece 6	21°	0°
Piece 7	21° 20'	20'
Average Angle	24° 10'	40'
Standard deviation	2° 20'	40'

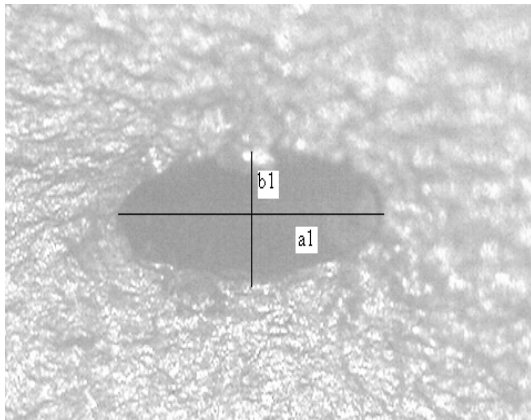
### 5.2.2.3. DC01 EXPERIMENTAL RESULTS

Description of each cone parameters can be seen in Table5.11.

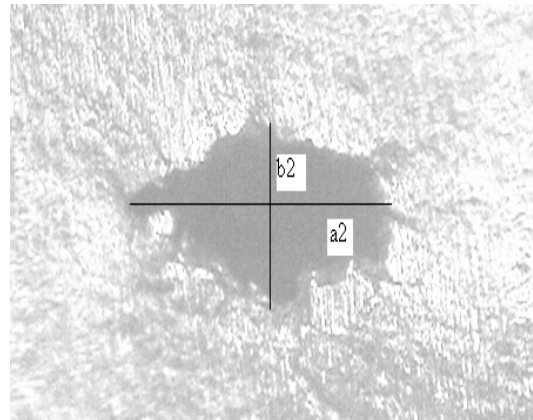
**Table5.11. DC01 cones details**

<b>Cone</b>	<b>Wall angle</b>	<b>Thickness (mm.)</b>	<b>Tool diameter (mm.)</b>
<b>Cone 10</b>	10°	1.15	10
<b>Cone 11</b>	20°	1.15	10
<b>Cone 12</b>	30°	1.15	10
<b>Cone 13</b>	40°	1.15	10
<b>Cone 14</b>	50°	1.15	10
<b>Cone 15</b>	55°	1.15	10
<b>Cone 16</b>	60°	1.15	10
<b>Cone 17</b>	65°	1.15	10
<b>Cone 18</b>	66°	1.15	10
<b>Cone 19</b>	67°	1.15	10

In Fig.5.24 and Fig.5.25, two holes after the SPIF process can be seen. Fig.5.24 corresponds to the outer surface of the cone and Fig.5.25 corresponds to the inner surface of the same cone.



**Fig.5.24. Picture of the outer surface**



**Fig.5.25. Picture of the inner surface**

In this case (DC01) only the influence of the wall angle is studied, because from the aluminium experience, it has been seen that the most important influence is the one given by the wall angle. In Table5.12 the influence of the wall angle on the shear angle can be seen.



Table5.12. Influence of the wall angle on the shear angle for DC01

Cone	Wall angle	Rolling direction		Transversal direction	
		Angle A	Angle B	Angle A	Angle B
<b>Cone 10</b>	10°	-10'	-9° 40'	-2° 20'	-12° 30'
<b>Cone 11</b>	20°	-4° 50'	-9° 10'	-9° 20'	-10° 20'
<b>Cone 12</b>	30°	-6°	2° 40'	-8° 50'	1° 20'
<b>Cone 13</b>	40°	12° 30'	1°	7° 40'	2°
<b>Cone 14</b>	50°	11° 20'	10° 10'	14°	8° 30'
<b>Cone 15</b>	55°	10° 10'	16° 30'	10° 10'	14° 40'
<b>Cone 16</b>	60°	9° 40'	20°	14° 20'	22°
<b>Cone 17</b>	65°	11° 40'	27°	12° 20'	26° 10'
<b>Cone 18</b>	66°	11° 50'	27° 30'	11° 50'	27° 10'
<b>Cone 19</b>	67°	12° 30'	19° 30'	12° 20'	18° 10'

All the values showed in the graph above are averages of the measured values. All these values in more details can be found in the appendix (A.2.) at the end of this document. In this same appendix, the reader can find as well the standard deviation of these values and can see that the standard deviation decreases as the wall angle increases. This is because of the increase of the accuracy of the drilled holes method as the wall angle increases; because the hole becomes easier to be seen under the microscope (the volume increase is bigger, thus the hole is bigger).

The strain measurements were done with the DC01 as well, and the results of these experiments can be seen on the Table5.13.

Table5.13. DC01 strain measurement

Cone	Volume increase	OUTSIDE				INSIDE			
		$\epsilon_{major}$	$\epsilon_{minor}$	$\epsilon_{thick}$	$\epsilon_{Sine}$	$\epsilon_{majo}$	$\epsilon_{mino}$	$\epsilon_{thick}$	$\epsilon_{Sine}$
<b>Cone 10</b>	-78.31%	-0.43	-0.48	0.91	-0.02	-1.15	-1.16	2.31	-0.02
<b>Cone 11</b>	-74.62%	-0.51	-0.64	1.15	-0.06	-0.88	-0.80	1.68	-0.06
<b>Cone 12</b>	-76.60%	-0.31	-0.66	0.97	-0.14	-0.76	-0.88	1.64	-0.14
<b>Cone 13</b>	19.95%	0.23	-0.25	0.02	-0.27	-0.21	-0.35	0.56	-0.27
<b>Cone 14</b>	77.67%	0.94	0.06	-1	-0.44	0.77	-0.10	-0.67	-0.44
<b>Cone 15</b>	146.67%	1.18	0.31	-1.49	-0.56	1.11	0.11	-1.22	-0.56
<b>Cone 16</b>	131.22%	1.42	0.53	-1.95	-0.69	1.19	0.32	-1.51	-0.69
<b>Cone 17</b>	215.38%	1.71	0.73	-2.43	-0.86	1.56	0.59	-2.15	-0.86
<b>Cone 18</b>	317.50%	1.83	0.92	-2.75	-0.90	1.68	0.70	-2.38	-0.90
<b>Cone 19</b>	426.16%	2.04	0.96	-3.00	-0.94	1.98	0.81	-2.79	-0.94

From these measurements some deductions have been made. First of all, it can be seen, that the volume increase is significant since cone 15, that is, 55° wall angle. That means, that this method can be used to calculate the strain measurement when the wall angle is smaller than 55°, beyond that point, the increase is more than two times, and it can be said that the hole produces a stress concentration and this method is no longer valid.

On the other hand, looking to the strain values, it can be seen, that the predicted thickness strain does not deviate a lot from the predicted one as in the aluminium case, and the strain values given by this method can be used in order to get an approximation of the real strain, because as I said before, the Sine Law does not take into account the material properties and because of that, this Law is not always applicable, and it can be seen that in this case, even if the volume increase is not that big, the predicted strain is quite smaller than the measured one.

In Fig.5.26, the thickness strain distribution is shown. In this figure, it can be seen, how the strain measured inside and outside the cone are quite similar regarding to the distribution in function of the wall angle. This same distribution is followed by the predicted one as well, but the slope is much smaller than the measured ones. It can be seen as well, in the same figure, that cones with wall angle of 40°, 50°, and 55° are the ones where the measured strains and the predicted one are almost the same.

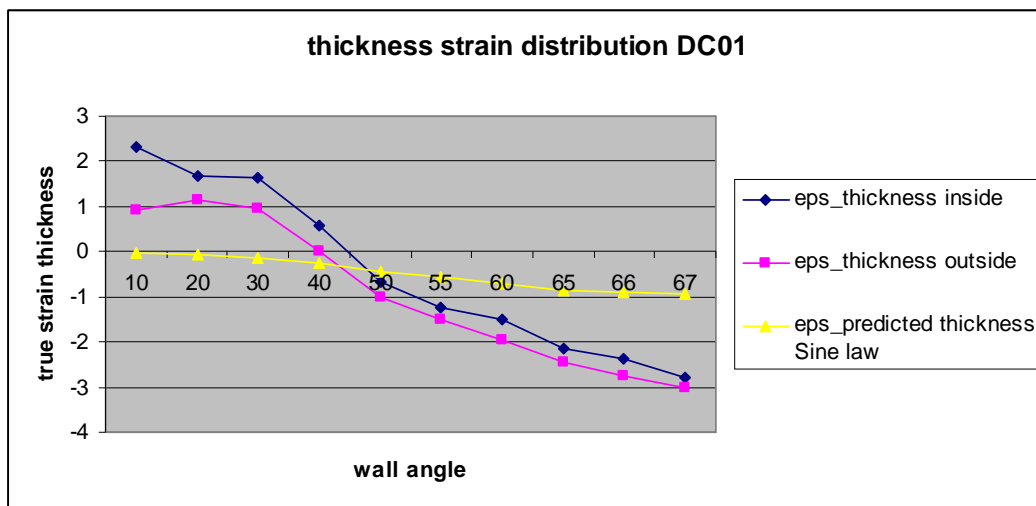


Fig.5.26. Thickness strain measurement

#### 5.2.2.4. CONCLUSION FOR SHEAR ANGLE MEASUREMENT

Some conclusion can be deduced from the measurements explained above.

Regarding to aluminium sheets, it has been proved that for small wall angle, the volume of the cone remains almost constant, and with that, it can be said that the hole does not act as a defect and thus, this method can be used in order to obtain the shear angle and the strain. However, as the wall angle increases, the volume increase get bigger and this method lose its accuracy due to the fact that the holes become defects on the sheet. Acting as a defect, there are some stress concentrations that can occur and thus, the strain and the shear angle given by the holes can be wrong.

Another important conclusion that has been proved is the influence of the wall angle on the shear angle. From the measurement done, it can be concluded that a bigger wall angle leads to a bigger shear angle. However, it has to be said that this influence is bigger and clearer in angle A. Angle B changes as well, but the order of change is smaller.

On the other hand, regarding to the DC01 measurements, similar conclusions have been deduced. There is a maximum wall angle that makes this method valid. In DC01 case, is 50°. Below this wall angle, the volume increase is not significant and the method remains valid.

It has been proved as well, that in DC01 case, this method can be used as a strain measurement.

Regarding to the shear angle results on DC01, it can be seen that there is not a big difference between the shear angles of the samples in the rolling direction and the shear angles of the samples in the transversal direction, however there is a small difference that can be explained by two different reasons, the first one is the lack of accuracy of the measurement since the measurements were done manually. The second possibility can be an influence on the measuring direction.

There is a clear increase of the shear angle as the wall angle increases. When the wall angle is small ( $10^\circ$  and  $20^\circ$ ) the shear angles are negatives and afterwards, by increasing the wall angle they become bigger and positives.

### 5.3. CONCLUSIONS

From the thickness analysis, it can be concluded that for the three materials there is no influence of the measurement direction (rolling or transversal direction) on the thickness profile. This conclusion can be clearly seen on all the profile thickness figures. The thickness distribution is almost the same in both directions, and the small differences that are seen can be attributed to the lack of accuracy of the method since the measurements were done manually.

Regarding to the Sine Law application, it has been seen that this law gives a good predictions of the final thickness in the case of the aluminium. In DC01 and DC06 cases, the predicted thickness by Sine is bigger than the measured one, if it is compared with the smallest thickness reached on the samples. However, the difference between them is the same regardless of the wall angle, and this predicted thickness can be used as an approximation of the final thickness of the sample in terms of average.

From the shear angle measurement it has been proved the influence of the wall angle on the shear angle. The greater wall angle the greater shear angle. It has been seen as well, that there is some differences in the shear angle values depending on the position of the measurement in the cone wall with respect to the rolling and transverse direction; nevertheless, there is not a clear tendency that proves that the measuring direction has a strong influence on the shear angle.

From the strain measurement, it has been concluded that when the wall angle is small and thus the volume increase is not significant this method can be used to calculate the strain of the sheet. Nevertheless, when the wall angle is big and the volume increase is more than 50%, this method is no longer valid and it can be said that at this moment, the hole is producing stress concentrations.

It has been seen as well the effect of the compositions of the steels on the limiting wall angle. DC01 has a bigger contain in carbon than DC06, and the limiting wall angle of DC01 is bigger than the limiting wall angle of DC06. Thus, it can be concluded that a higher contain in carbon leads to an increase of the limiting wall angle.

## 6. MICROSCOPE

### 6.1. METHOD

The objective of this part of the thesis is the microstructural analysis of the tested samples in Dome Test and in Single Point Incremental Forming tests.

The first step was to cut small pieces from the samples. The pieces were cut in different directions and regions in order to obtain the microstructure of a fixed area.

Once the pieces were cut, the next step was to embed the samples in resin. For that, the Predopress was used. The Predopress is a fully automatic mounting press machine for hot mounting of all materials. Some technical details of the Predopress can be seen in Table 6.1.

**Table 6.1. Predopress technical details**

Press	0-50 kN.
Temperature	180°C.
Diameter	25 and 30 mm.

In Fig. 6.1 a picture of the Predopress can be seen.



**Fig. 6.1. Predopress picture**

Once the samples were all embedded, the next step was the grinding and polishing of the samples. For this part, the Pedemax machine was used. With the Pedemax machine several samples in a sample holder disc are grinded simultaneously on a grinding paper or diamond grinding disc. Two speeds are possible. The machine consists of one motor and one 300 mm. rotating disc, with built-in disc cooling. In Fig. 6.2 the Pedemax can be seen.



**Fig.6.2. Pedemax picture**

Once the samples have been grinded and polished, they were etched with Nital in order to see them under the microscope.

### **6.1.1. LIGHT OPTICAL MICROSCOPE**

The microscope used was the Inverted light optical microscope for the microscopic analysis of metallic, ceramic, polymeric and composite materials Leica DMILM HC. Some technical details of this microscope can be seen in Table6.2.

**Table6.2. Leica DMILM HC**

Lamps	Halogen lamp 12V-100W
Objective lenses	4x/0.10; 10x/0.22; 50x/0.75; 100x/0.90
Photography	Digital camera coolpix 990

### **6.1.2. SCANNING ELECTRON MICROSCOPE**

The microscope used was the PHILIPS scanning electron microscope XL30 FEG. The scanning electron microscope Philips XL 30 FEG employs a Schottky based gun design using a point-source cathode of tungsten which has a surface layer of zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ). In Fig.6.3 SEM picture can be seen.



**Fig.6.3. SEM picture**

In Table6.3 some technical details of the SEM can be seen.

**Table6.3. PHILIPS scanning electron microscope XL30 FEG technical details**

Resolution	2.0 nm at 30 KV; 5.0 nm at 1 KV
High tension	continuously variable from 0.2 till 30 KV
Specimen stage	
X & Y	50 mm
Z	8 mm + 20 mm inside
Rotation	n x 360°
Tilt	at FWD 10 mm, -15° to +75°
Vacuum system	
Specimen chamber, ODP	$1 \times 10^{-4}$ Pa ( $1 \times 10^{-6}$ mbar)
Intermediate vacuum, IGP	$1 \times 10^{-5}$ Pa ( $1 \times 10^{-7}$ mbar)
Gun vacuum, IGP	$5 \times 10^{-7}$ Pa ( $1 \times 10^{-9}$ mbar)
Image storage	standard image ( 712 x 484 pixels - 341 KB), high definition image ( 1424 x 968 pixels - 1.31 MB ) or extended high definition ( 2576 x 1936 pixels - 4.76 MB + image file 1.41 MB ).
Backscattered electron detector	better then 0.1 Z at Z = 30
High resolution photomonitor	vertical positioned 7", 2000 line monitor
Edax	
Super Ultra thin Window - detection from Boron	
Resolution	129 eV F.W.H.M. by MnK $\alpha$
Software:	Genesis 4.61: spectral analysis, maps and linescan

In this case, after the etching, a carbon coating was needed, because for this microscope, the sample must be conductive. Before the carbon coating the sample was glued to the stand with liquid carbon. After 30 minutes in the vacuum chamber the sample was ready to be coated. For the carbon coating the carbon wire coater was used. It is not possible to sputter carbon in a conventional sputter coater, but it is possible to use carbon fibre at low pressure (RP) to evaporate carbon on samples. Therefore a carbon fibre is mounted between two electrodes which are connected to a high current. When a carbon fibre is under vacuum, first a low value current (5A) should pass through because it needs to be out gassed and relaxed. Then the fibre should be pulse-flashed at high current for a few seconds a number of times, until there is sufficient coating. This method does not need any inert gas as it is an evaporation technique.

In Fig.6.4 the carbon wire coater can be seen.



**Fig.6.4. Carbon wire coater**

Some technical details of the carbon wire coater can be seen in Table6.4.

**Table6.4. Carbon wire coater technical details**

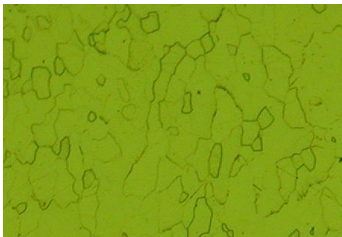
Power	Continuously variable current 0-15 A.
Sample table	100 mm. diameter
Vacuum	$8 \times 10^{-2}$ mbar.

## 6.2. EXPERIMENTAL RESULTS

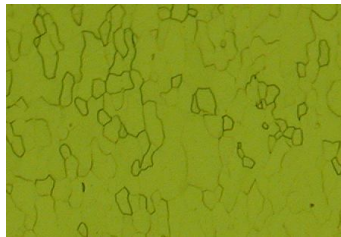
In this part, pictures taken with the microscope and discussion about the obtained pictures will be commented. This analysis has been done for DC01 and DC06, taking samples from the tested samples in SPIF and in the Dome Test.

### 6.2.1. DC01 EXPERIMENTAL RESULTS

In Fig.6.5 is a piece taken from sample DC01 10° wall angle. Fig.6.6 is a piece taken from the sample DC01 20° wall angle and Fig.6.7 is a piece taken from the sample DC01 with 30° wall angle. All of them are in the rolling direction and in the wall direction. The three pictures are at the same magnification.



**Fig.6.5. DC01 10° wall angle**  
RD and WD lie vertically



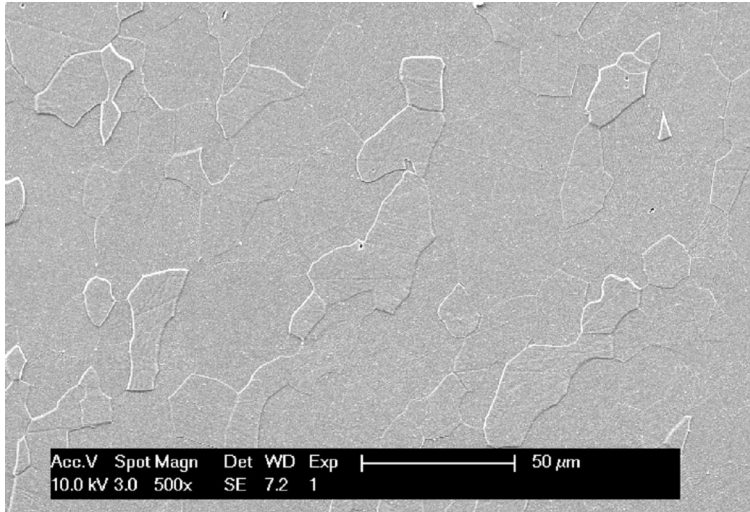
**Fig.6.6. DC01 20° wall angle**  
RD and WD lie vertically



**Fig.6.7. DC01 30° wall angle**  
RD and WD lie vertically

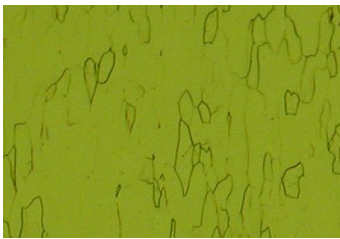
In Fig.6.8 the same sample DC01 with 20° wall angle is shown but this time under the SEM.



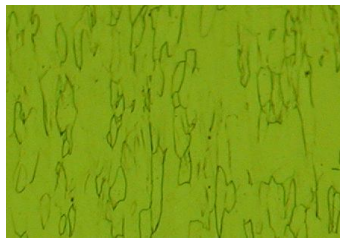


**Fig.6.8. DC01 20° wall angle. The RD and the WD lie vertically**

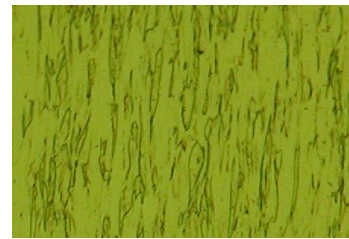
In Fig.6.9 is a piece taken from sample DC01 40° wall angle. Fig.6.10 is a piece taken from the sample DC01 50° wall angle and Fig.6.11 is a piece taken from the sample DC01 with 66° wall angle. All of them are in the rolling direction and in the wall direction. The three pictures are at the same magnification.



**Fig.6.9. DC01 40° wall angle  
RD and WD lie vertically**

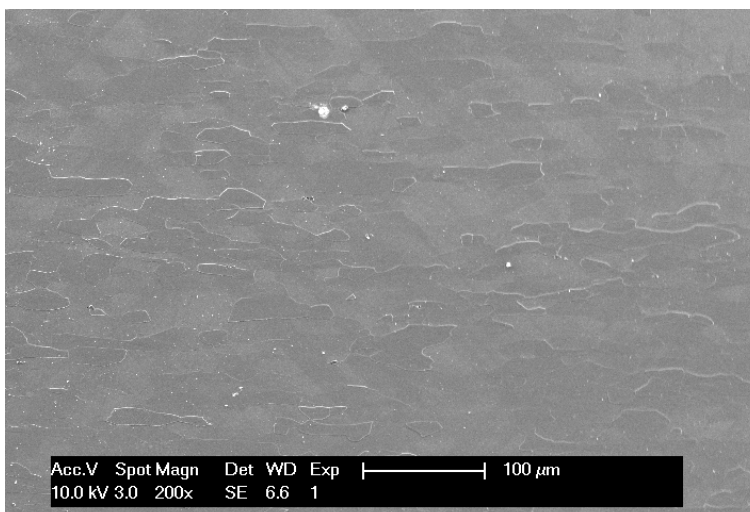


**Fig.6.10. DC01 50° wall angle  
RD and WD lie vertically**



**Fig.6.11. DC01 66° wall angle  
RD and WD lie vertically**

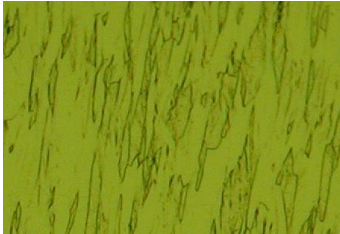
In Fig.6.12 the same sample as the figures above is shown but this time, under the SEM.



**Fig.6.12. DC01 40° wall angle. The RD and the WD lie horizontally**



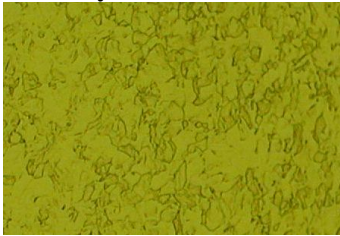
In Fig.6.13 shows a piece taken from the sample DC01 with 60° wall angle in the rolling direction and the wall direction. Fig.6.14 shows a picture of a piece taken from the sample DC01 with 60° wall angle in the transversal direction and the wall direction. Fig.6.15 shows a piece taken from the sample DC01 60° wall angle in the rolling direction and in the plane strain direction. Fig.6.16 shows a piece taken from the sample DC01 60° wall angle cut in the transversal direction and in the plane strain direction.



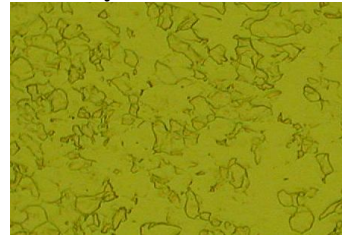
**Fig.6.13. DC01 60° wall angle RD and WD lie vertically**



**Fig.6.14. DC01 60° wall angle TD and WD lie vertically**

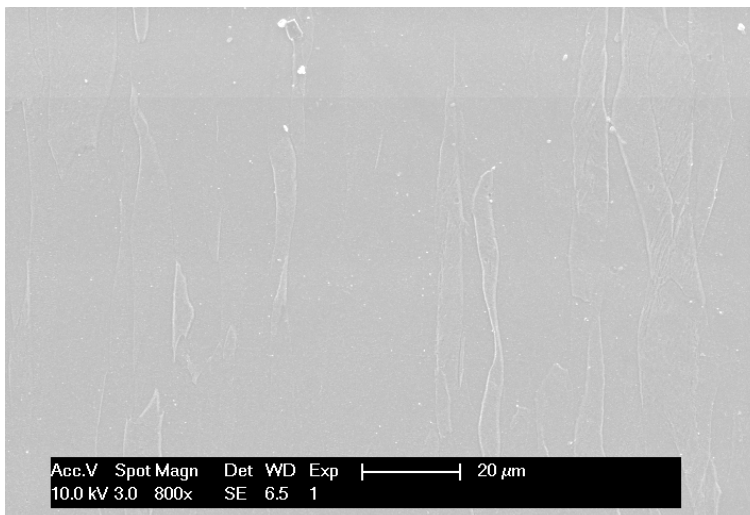


**Fig.6.15. DC01 60° wall angle RD, thickness direction lies vertically and PSD lies horizontally**



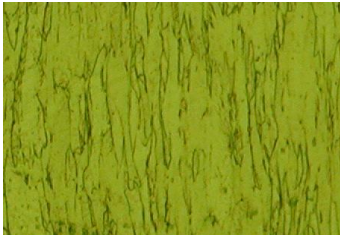
**Fig.6.16. DC01 60° wall angle TD. Thickness direction lies vertically and PSD lies horizontally**

In Fig.6.17 the DC01 60° wall angle, in the rolling direction and in the wall direction under the SEM is shown

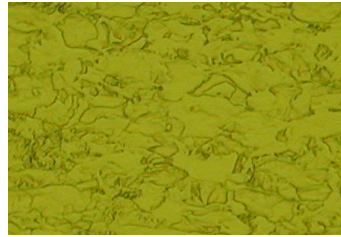


**Fig.6.17. DC01 60° wall angle. The RD and the WD lie vertically**

In Fig.6.18 and Fig.6.19 a piece taken from the sample DC01 with 67° wall angle (limiting wall angle) in the rolling direction and in the plane strain direction is shown.

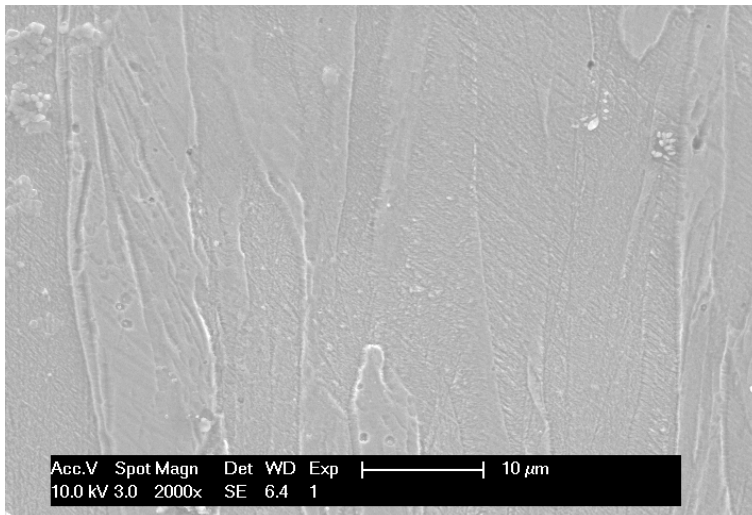


**Fig.6.18. DC01 67° wall angle RD and WD lie vertically**



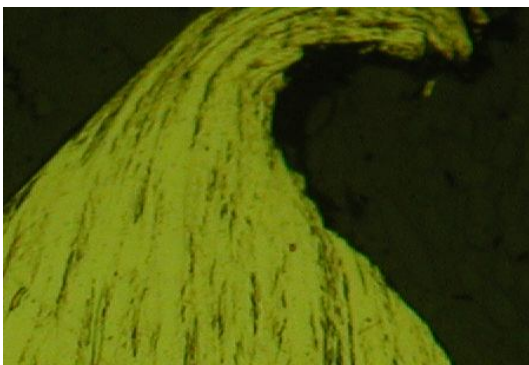
**Fig.6.19. DC01 67° wall angle RD. thickness direction lies vertically and PSD lies horizontally**

In Fig.6.20 the DC01 67° wall angle, in the rolling direction and in the wall direction under the SEM is shown

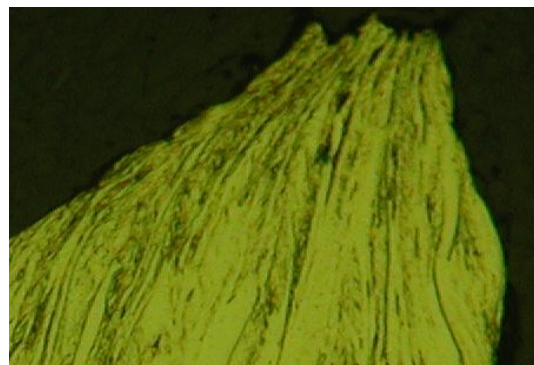


**Fig.6.20. DC01 67° wall angle. The RD and the WD lie vertically**

Samples from the Dome test samples have been seen under the microscope as well. Fig.6.21 shows a sample from a plane strain state and Fig.6.22 shows a sample from the equibiaxial state.



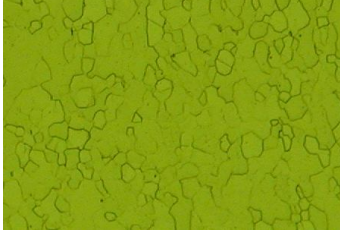
**Fig.6.21. DC01 plane strain state. The thickness direction lies horizontally.**



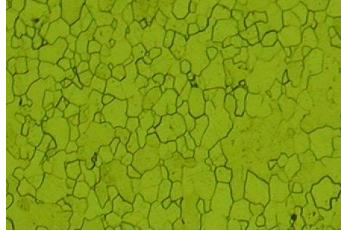
**Fig.6.22. DC01 equibiaxial state. The thickness direction lies horizontally.**

### 6.2.2. DC06 EXPERIMENTAL RESULTS

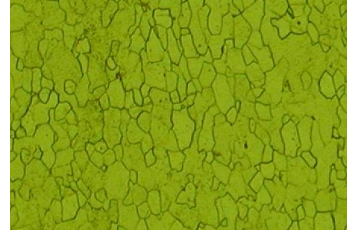
In Fig.6.23 is a piece taken from sample DC06 10° wall angle. Fig.6.24 is a piece taken from the sample DC06 20° wall angle and Fig.6.25 is a piece taken from the sample DC06 with 30° wall angle. All of them are in the rolling direction and in the wall direction. The three pictures are at the same magnification.



**Fig.6.23. DC06 10° wall angle**  
RD and WD lie vertically

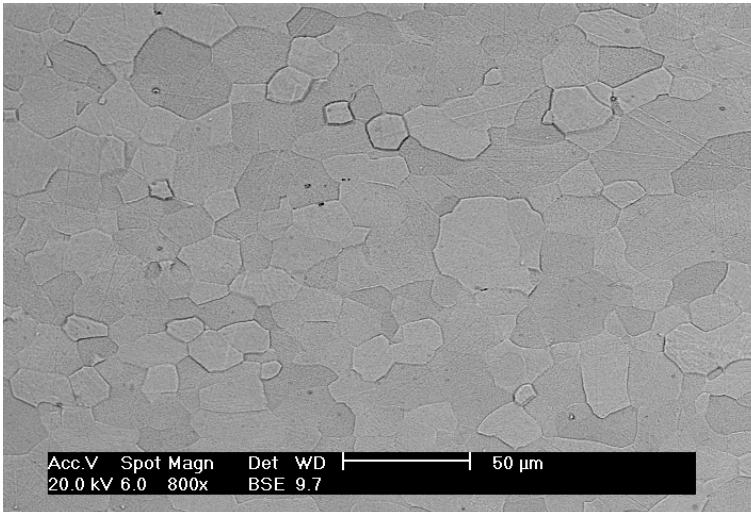


**Fig.6.24. DC06 20° wall angle**  
RD and WD lie vertically



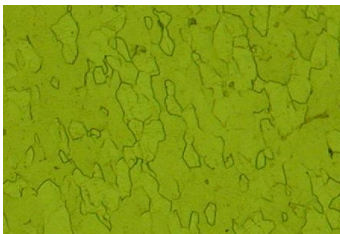
**Fig.6.25. DC06 30° wall angle**  
RD and WD lie vertically

In Fig.6.26 the sample DC06 with 10° wall angle in the rolling direction and the wall direction is shown but this time, under the SEM.



**Fig.6.26. DC06 10° wall angle and. The RD and the WD lie vertically**

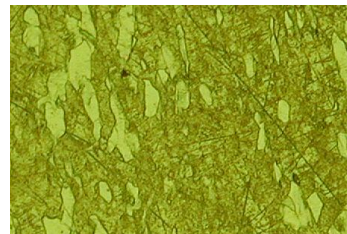
In Fig.6.27 is a piece taken from sample DC06 40° wall angle. Fig.6.28 is a piece taken from the sample DC06 50° wall angle and Fig.6.29 is a piece taken from the sample DC06 with 60° wall angle. All of them are in the rolling direction and in the wall direction. The three pictures are at the same magnification.



**Fig.6.27. DC06 40° wall angle**  
RD and WD lie vertically



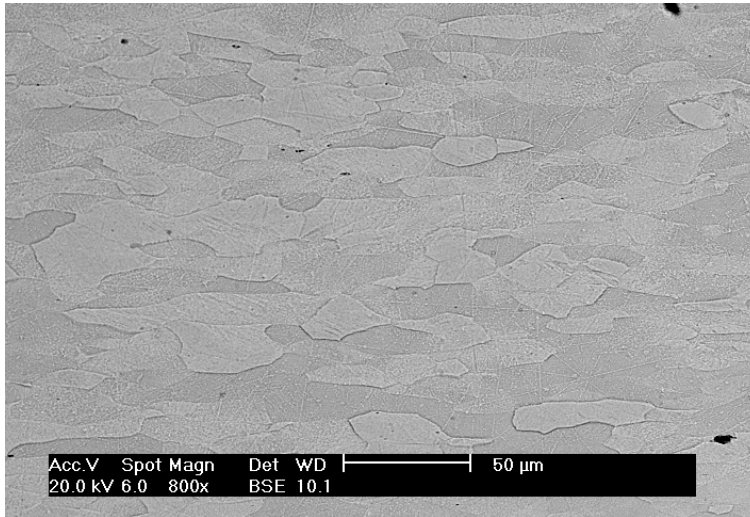
**Fig.6.28. DC06 50° wall angle**  
RD and WD lie vertically



**Fig.6.29. DC06 60° wall angle**  
RD and WD lie vertically

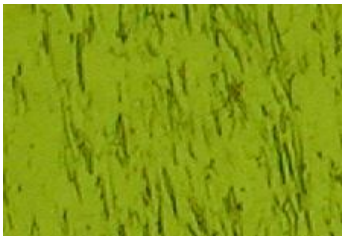


In Fig.6.30 the sample DC06 with 50° wall angle is shown but this time, under the SEM.

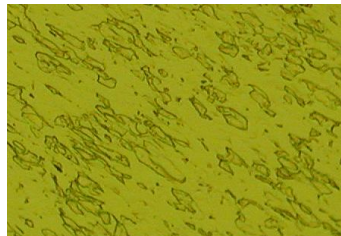


**Fig.6.30. DC06 50° wall angle. The RD and the WD lie horizontally**

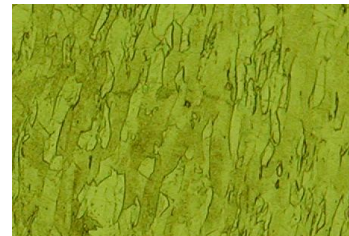
In Fig.6.31 is a piece taken from sample DC06 65° wall angle. Fig.6.32 is a piece taken from the sample DC06 66° wall angle and Fig.6.33 is a piece taken from the sample DC06 with 67° wall angle. All of them are in the rolling direction and in the wall direction. The thickness direction lies horizontally. The three pictures are at the same magnification.



**Fig.6.31. DC06 65° wall angle  
RD and WD lie vertically**

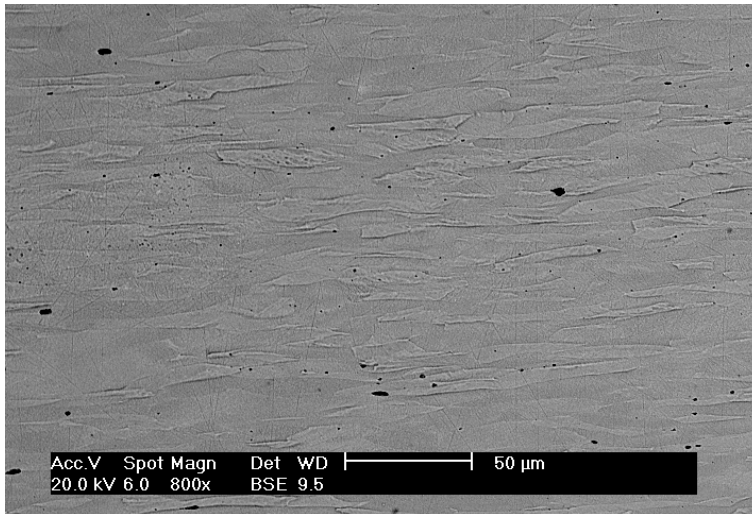


**Fig.6.32. DC06 66° wall angle  
RD and WD lie at 45°**



**Fig.6.33. DC06 67° wall angle  
RD and WD lie vertically**

In Fig.6.34 the sample with 65° wall angle is shown but this time, under the SEM.

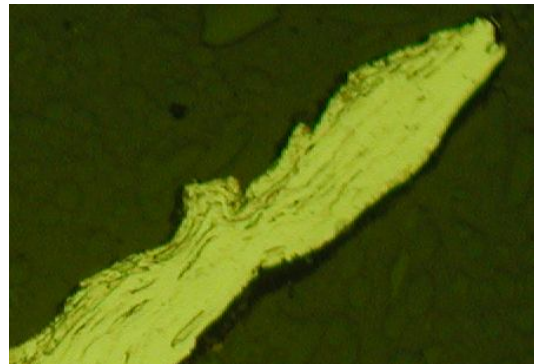


**Fig.6.34. DC06 65° wall angle. The RD and the WD lie horizontally**

Samples from the Dome test samples have been seen under the microscope as well. Fig.6.35 shows a sample from a plane strain state and Fig.6.36 shows a sample from the equibiaxial state.



**Fig.6.35. DC06 plane strain state. The thickness direction lies horizontally.**



**Fig.6.36. DC06 equibiaxial state. The thickness direction lies horizontally.**

### 6.3. CONCLUSIONS

As it can be seen in the pictures, when the wall angle is bigger, the grains seen under the microscope are more stretched, that is, more deformed in the direction of the wall cone.

When the picture is taken in the plane strain direction and not in the wall direction, the grain's shape is completely different; they are not deformed along one direction but along two. That can be clearly seen from Fig.6.20 to Fig.6.25.

A comparison between the grain's shape in the rolling direction and the transversal direction has been done as well without an evidence of difference between them after the SPIF process.

Finally, the Dome Test samples have been seen under the microscope. The parts seen in the pictures are at the fracture point. It can be seen how the grains are deformed and it can be seen as well, the apparition of the voids that lead to the fracture of the sample.

## 7. GENERAL CONCLUSIONS

From the Dome test, the forming limit curve of DC01 and DC06 has been obtained. The best lubrication conditions were taken into account and the searched points were the plane strain state and the equibiaxial state. The first one (plane strain state) was reached with a specific sample width and fit quite well with the forming limit curve obtained with other methods. Nevertheless, the results obtained for the equibiaxial state depart from the expected ones (the theoretical ones). This phenomenon can be due to friction problems leaded by a bad lubrication or due to draw in of the sample due to a low clamping pressure.

From the thickness analysis in single point incremental forming it can be concluded that for the three materials there is no influence of the measurement direction (rolling or transversal direction) on the thickness profile. The thickness distribution is almost the same in both directions, and the small differences that are seen can be attributed to the lack of accuracy of the method since the measurements were done manually.

Regarding to the Sine Law application, it has been seen that this law gives a good prediction of the final thickness in the case of the aluminium. In DC01 and DC06 cases, the predicted thickness by the Sine law is bigger than the measured one, if it is compared with the smallest thickness reached on the samples. However, the difference between them is the same regardless of the wall angle, and this predicted thickness can be used as an approximation of the final thickness of the sample in terms of average because Sine Law is based in the volume conservation principle and thus, the thickness given by this law can be taken as an average of the thickness within the wall cone.

From the shear angle measurement it has been proved the influence of the wall angle on the shear angle. The greater wall angle the greater shear angle. It has been seen as well, that there are some differences in the shear angle values depending on the position of the measurement in the cone wall with respect to the rolling and transverse direction; nevertheless, there is not a clear tendency that proves that the measuring direction has a strong influence on the shear angle.

In order to use the method of the drilled holes, the differences in the mechanical behaviour that the drilled holes may introduce must be taken into account. That is why, beside the shear angle, the strain has been measured in order to establish a wall angle threshold above which the method is no longer valid, because of the stress concentrations introduced by the drilled holes.

The effect of the compositions of the steels on the limiting wall angle has also been studied. A higher contain in carbon leads to an increase of the limiting wall angle in steels. It has to be said that this conclusion needs more tests in order to take into account the statistical variations.

From the microstructural analysis of the samples under the microscope it has been seen how the grains suffer a higher elongation in the direction of the wall when the wall angle increases. It has been seen as well the shape of the grains in the tool direction (plane strain direction) and how this shape is completely different from the shape of the grains in the wall direction. The last ones are elongated in two directions instead of only one, the plane strain direction (tool direction) and the thickness direction.

Finally, the Dome Test samples have been seen under the microscope. The parts seen in the pictures are at the fracture point. It can be seen how the grains are deformed

## 7. GENERAL CONCLUSIONS

and it can be seen as well, the apparition of the voids that lead to the fracture of the sample.

## 8. REFERENCE LIST

- 2002 FILLICE L., FRATINI L. and MICARI F. “Analysis of materials formability in incremental forming”. CIRP Annals-Manufacturing Technology Vol. 51, Issue 1, Pages 199-202, 2002
- 2002 HAGAN E. and JESWIET J., “A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods”. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture, 2002
- 2003 HAGAN E. and JESWIET J., “Effect of wall angle on Al3003 strain hardening for parts formed by computer numerical control incremental forming”. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part B: J. Engineering Manufacture, 2003
- 2004 ISO (the international organization for standardization). “Metallic materials-Determination of forming limit diagrams. Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory”. ISO/WD 12004:2004 E, 2004
- 2005 FAHRETTIN O. and DAEYONG L., “Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test”. Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 247-253, 2005
- 2005 JESWIET J. and MICARI F. “Asymmetric single point incremental forming of sheet metal”. CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 54. Issue 2, pages 88-114, 2005
- 2007 HUSSEIN G., GAO L. and DAR N. U., “An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming”. Journal of Materials Processing Technology 186 (2007) 45-53, 2007
- 2007 FLORES P., BONNET F. and HABRAKEN A. M. “Plane strain test for metal sheet characterization”. Key Engineering Materials Vol. 344 (2007) pp. 135-142, 2007
- 2008 EYCKENS P., VAN BAELE A. and VAN HOUTTE P., “An extended Merciniak-Kuczynski forming limit model to assess the influence of through-thickness shear on formability”, 2008
- 2008 Private Communication by Arcelor Mittal.

### INTERNET ADDRESSES

<http://www.sciencedirect.com>

<http://apps.isiknowledge.com>

<http://www.matweb.com>

<http://www.mtm.kuleuven.be/Research/Equipment/List.html>



## APPENDIX A.1.

### THICKNESS PROFILE DC01

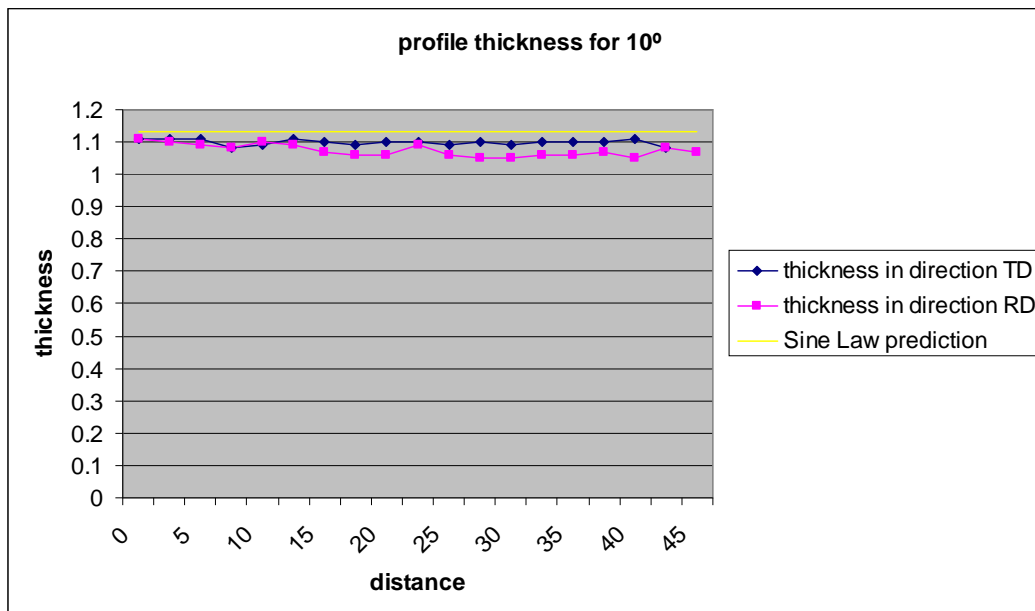


Fig.1. Profile thickness DC01 with 10° wall angle

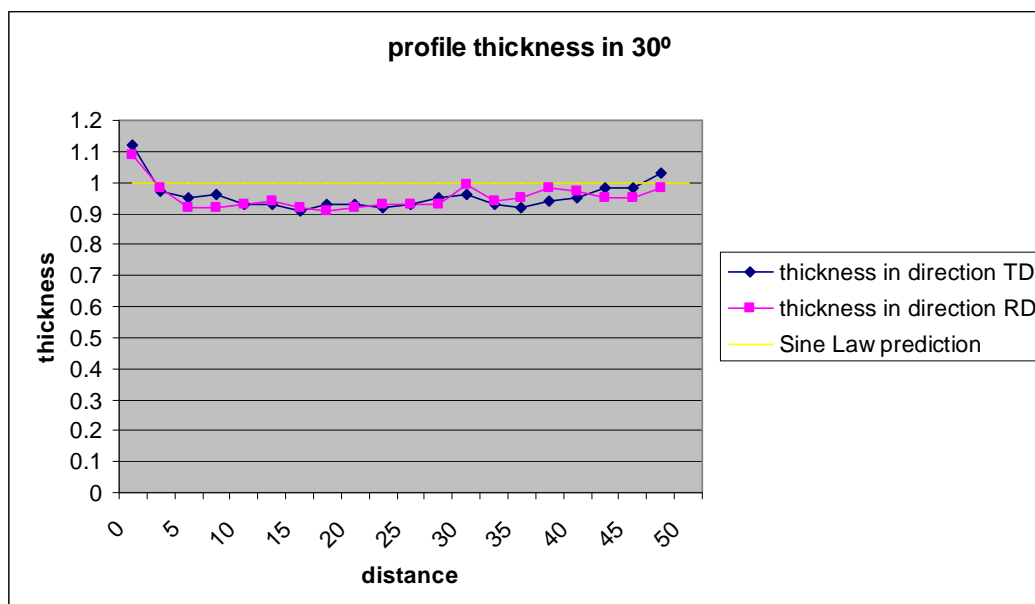
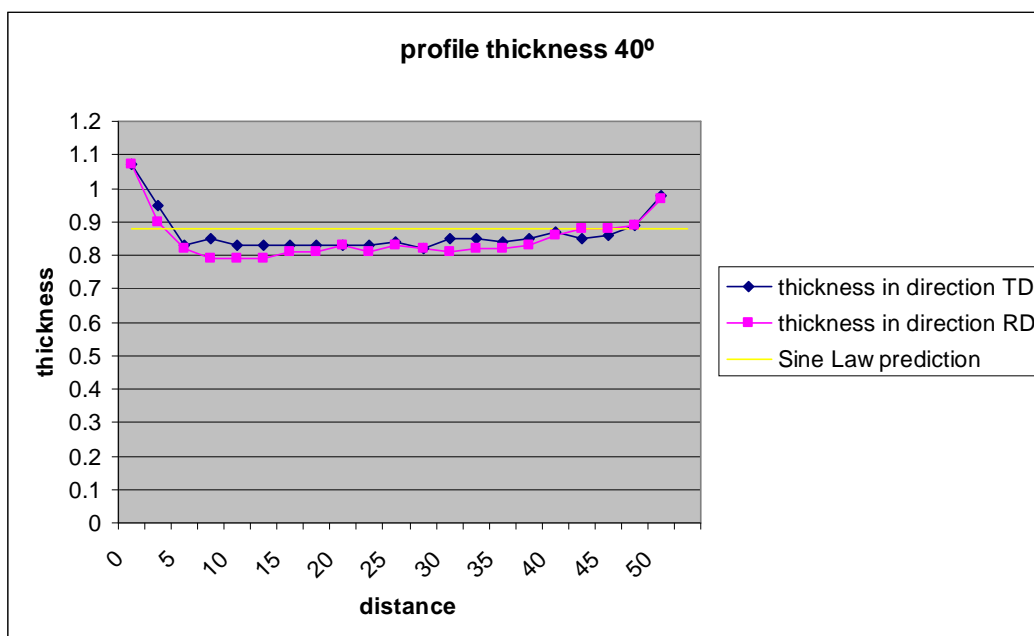
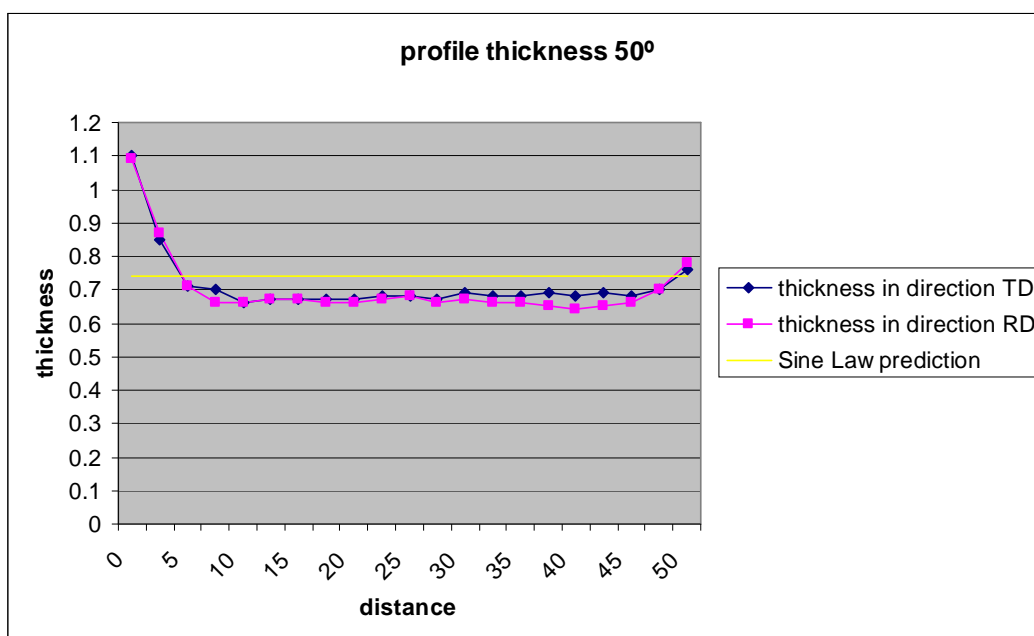


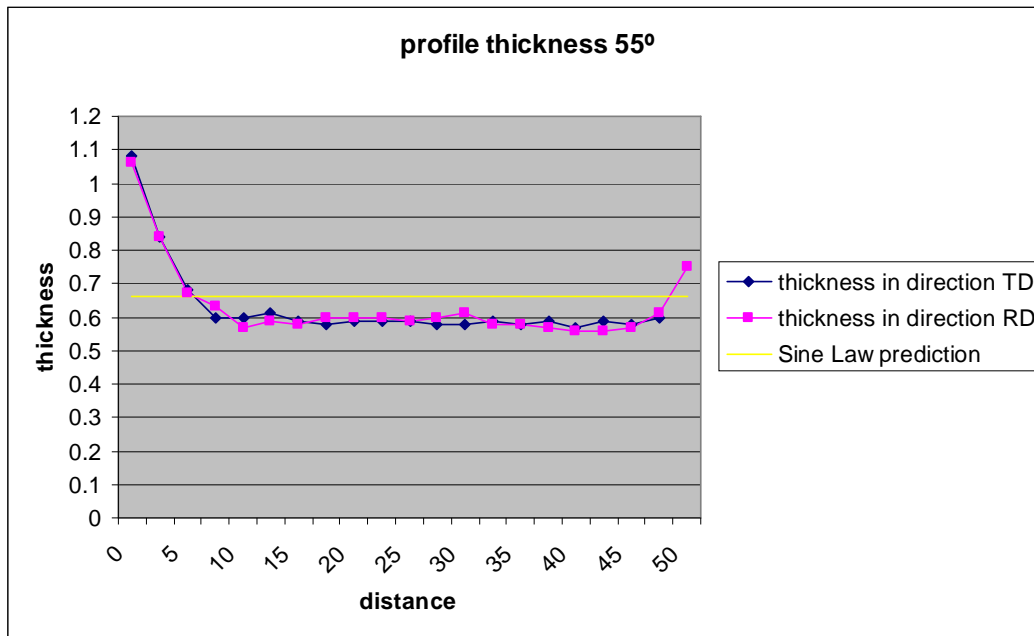
Fig.2. Profile thickness DC01 with 30° wall angle



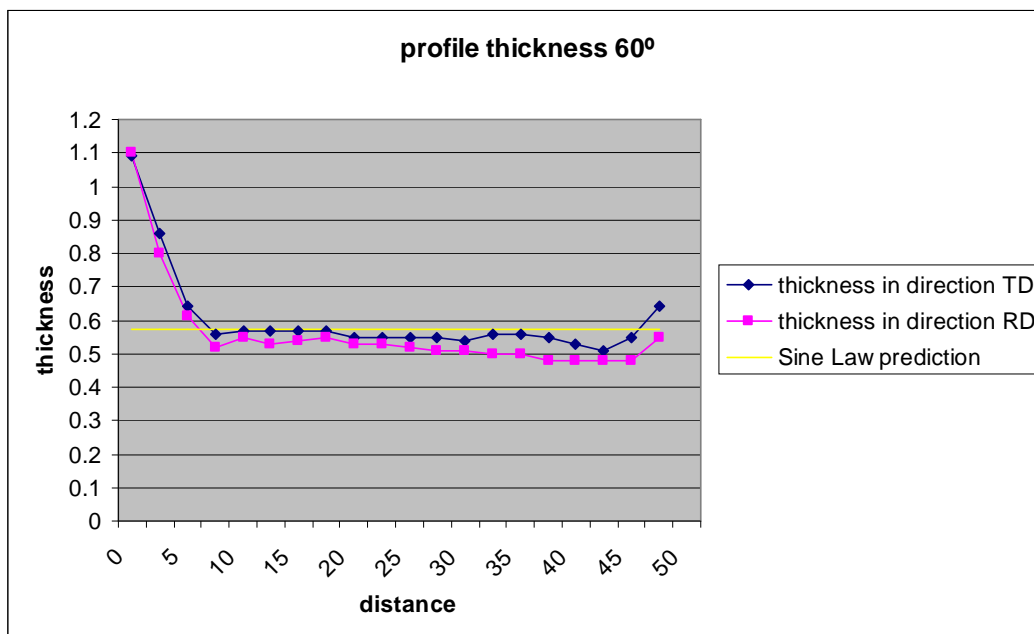
**Fig.3. Profile thickness DC01 with 40° wall angle**



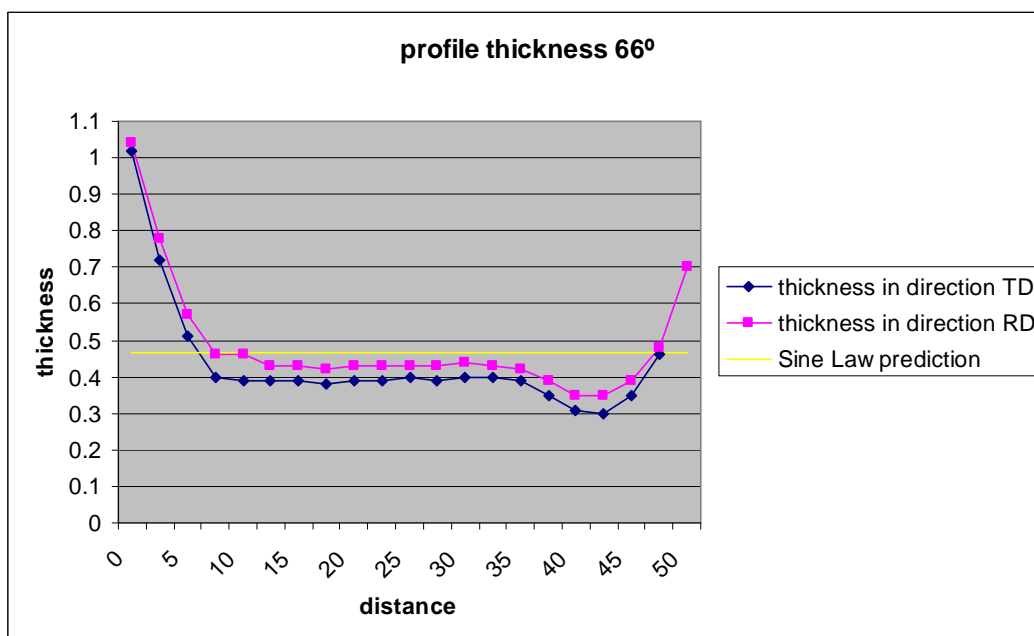
**Fig.4. Profile thickness DC01 with 50° wall angle**



**Fig.5. Profile thickness DC01 with 55° wall angle**

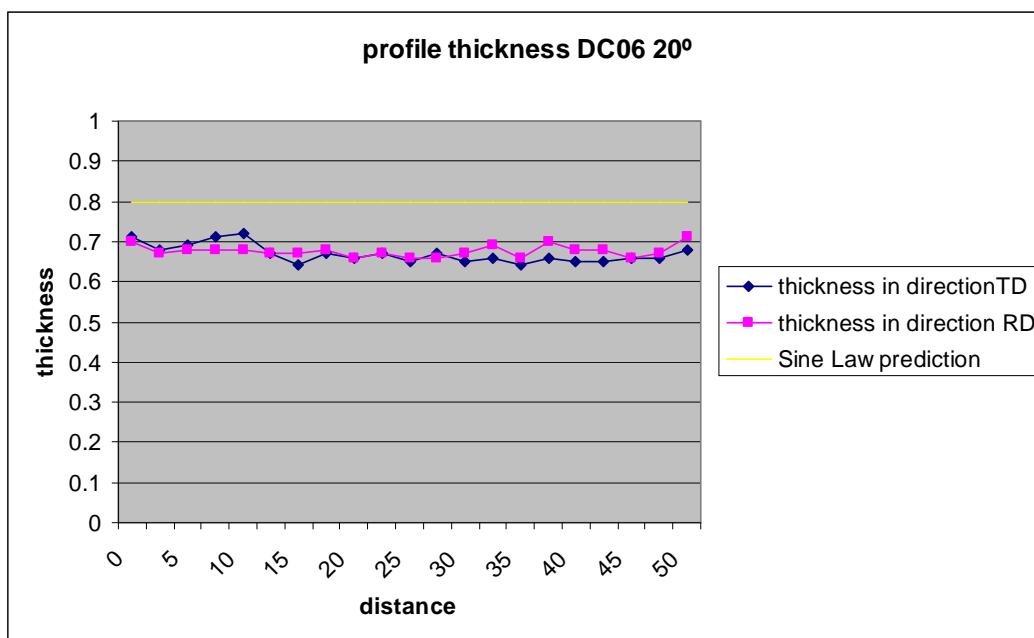


**Fig.6. Profile thickness DC01 with 60° wall angle**



**Fig.7. Profile thickness DC01 with 66° wall angle**

## THICKNESS PROFILE DC06



**Fig.8. Profile thickness DC06 with 20° wall angle**

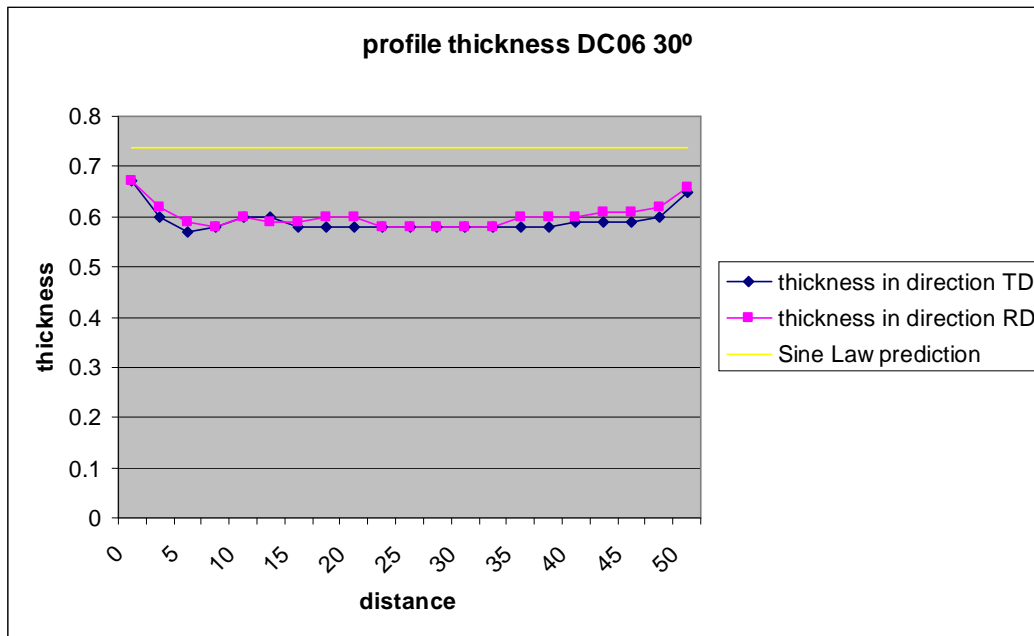


Fig.9. Profile thickness DC06 with 30° wall angle

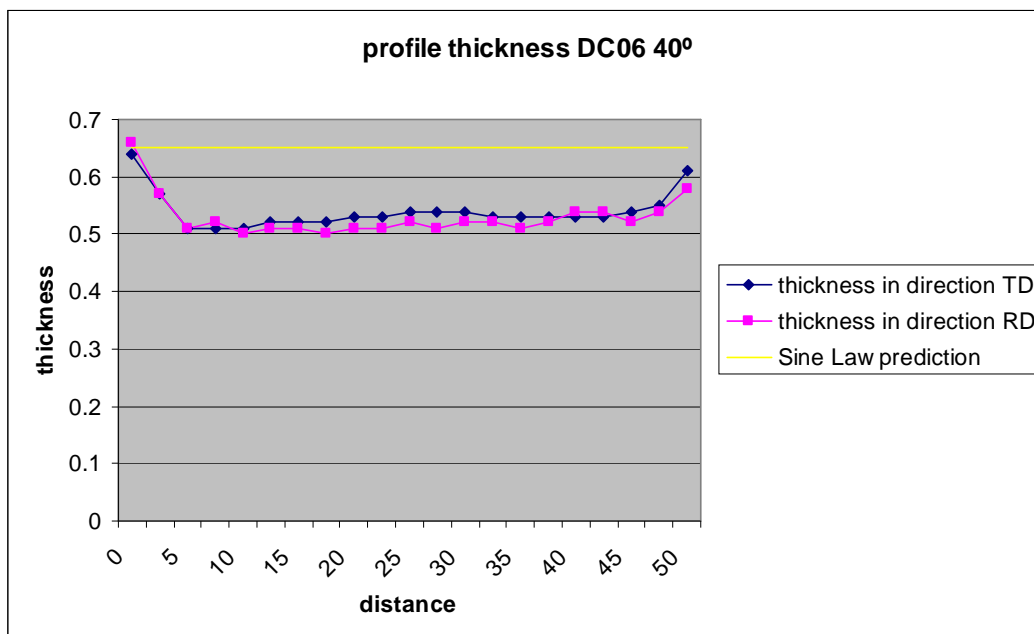
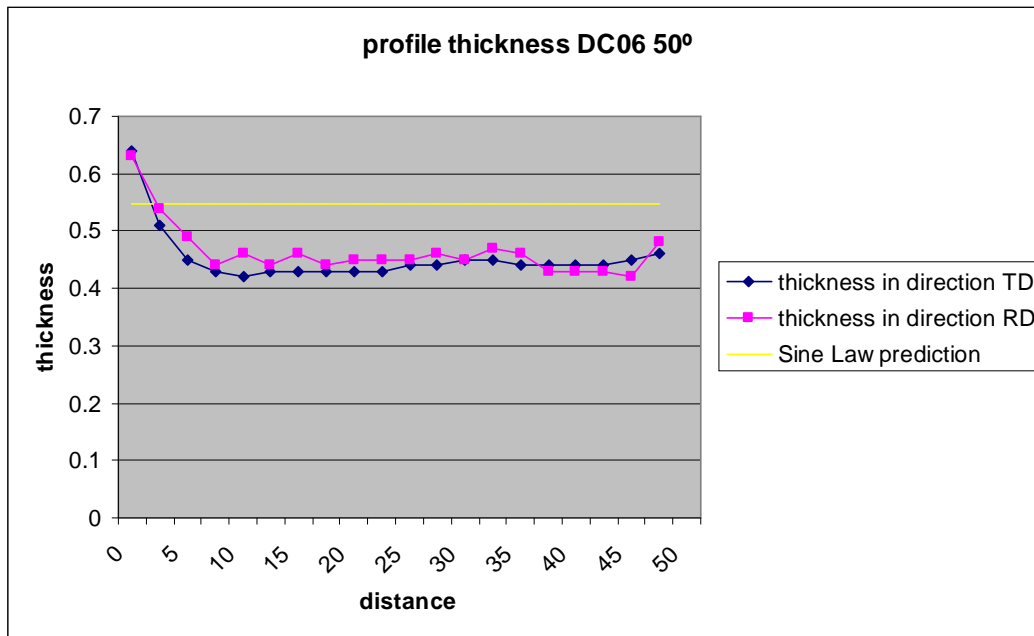
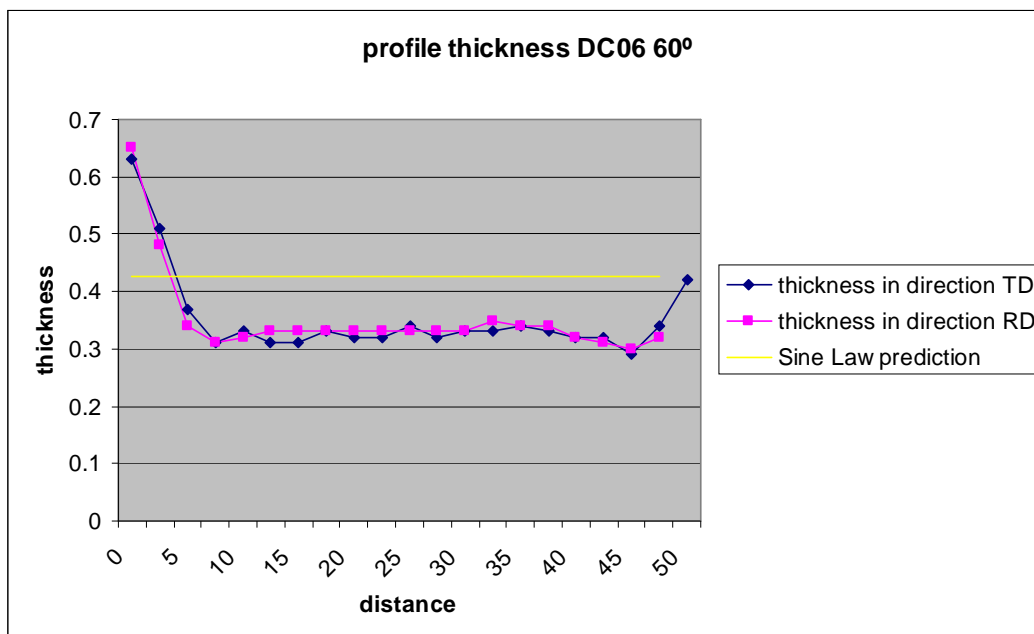


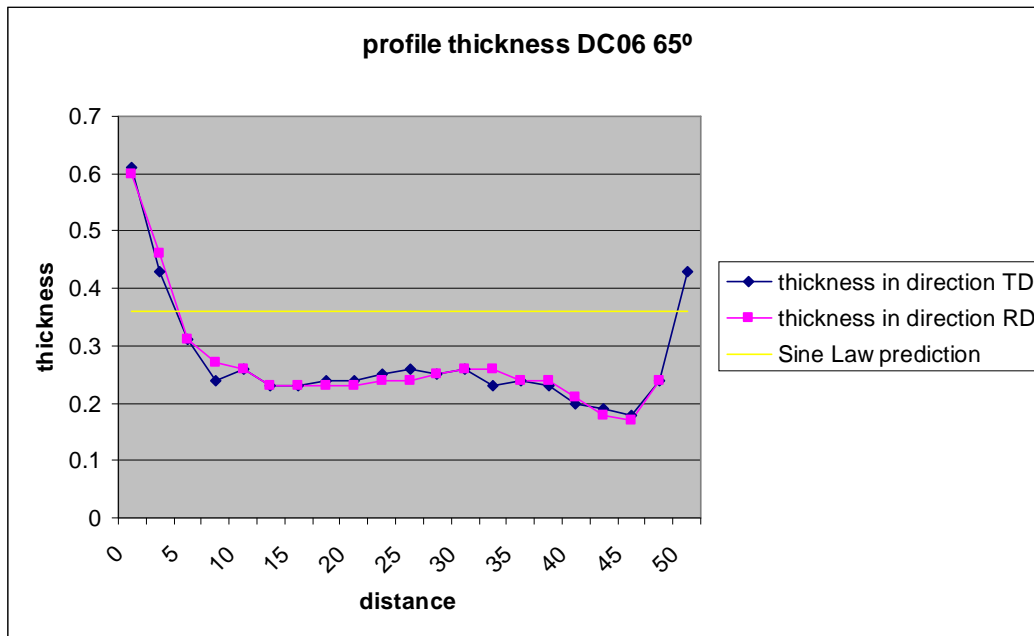
Fig.10. Profile thickness DC06 with 40° wall angle



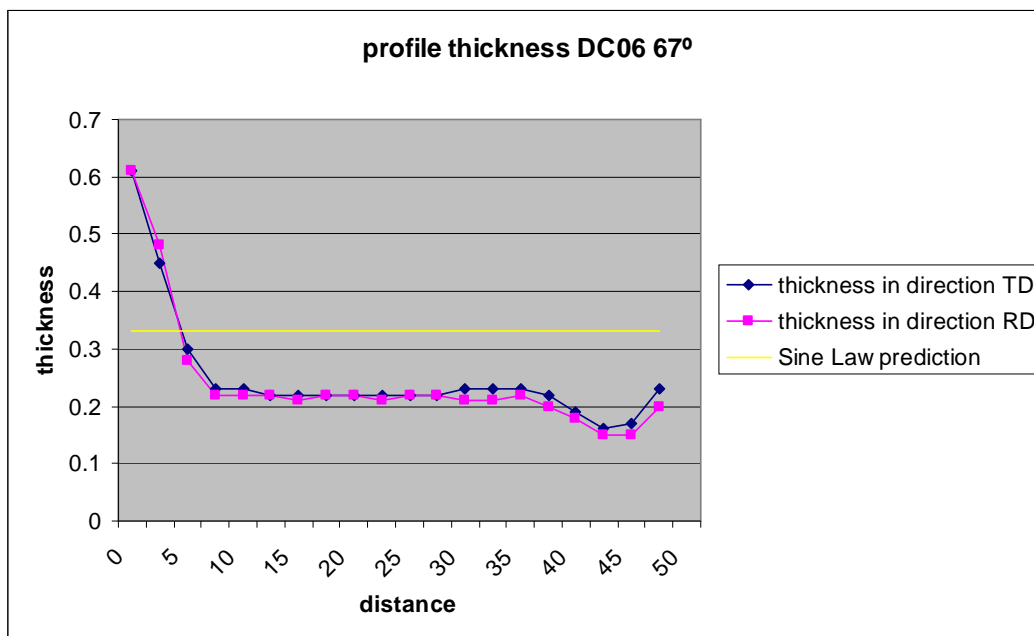
**Fig.11. Profile thickness DC06 with 50° wall angle**



**Fig.12. Profile thickness DC06 with 60° wall angle**



**Fig.13. Profile thickness DC06 with 65° wall angle**



**Fig.14. Profile thickness DC06 with 67° wall angle**

**APPENDIX A.2.****SHEAR ANGLE MEASUREMENT ALUMINIUM****Table1. Cone 20° wall angle, 10 mm. tool diameter and 1.15 mm. thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	10°	- 6° 40'
	2	3° 20'	- 7°
	3	4° 20'	- 6° 40'
Transversal direction	4	6° 40'	- 5°
	5	8° 40'	- 4° 40'
	6	5° 40'	- 8°

**Table2. Cone 20° wall angle, 10 mm. tool diameter and 1.15 mm. thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	5.89	3.59
	B	-6.78	0.19
Transversal Direction	A	7	1.53
	B	-5.89	1.84

**Table3. 60° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	14°	12°
	2	9°	4°
	3	11°	11° 20'
Transversal direction	4	9° 40'	- 2°
	5	14°	- 40'
	6	11° 20'	- 3°

**Table4. Cone 60° wall angle, 10 mm. tool diameter and 1.15 mm. thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	11.33	2.52
	B	9. 11	4.44
Transversal Direction	A	11. 67	2.19
	B	-1. 89	1.17



**Table5. 20° 25 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	0°	8°
	2	6°	8°
	3	6°	8°
Transversal direction	4	5°	- 6° 40'
	5	5°	- 6° 40'
	6	3°	- 4° 40'

**Table6. Cone 20° wall angle, 25 mm. tool diameter and 1.15 mm. thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	4	3.46
	B	8	0
Transversal Direction	A	4.33	1.15
	B	-6	1.15

**Table7. 60° 25 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	8° 40'	3°
	2	9°	1°
	3	5°	6° 40'
Transversal direction	4	4°	6° 20'
	5	6°	1° 20'
	6	2°	2° 20'

**Table8. Cone 60° wall angle, 25 mm. tool diameter and 1.15 mm. thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	7.56	2.22
	B	3. 56	2.87
Transversal Direction	A	4	2
	B	3. 33	2.65

**Table9. 20° 10 mm tool diameter 1.50 mm thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	- 5° 40'	1° 20'
	2	0°	2° 40'
	3	0°	1°
Transversal direction	4	- 20'	1° 20'
	5	2° 40'	3° 20'
	6	- 40'	3° 20'

**Table10. Cone 20° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.50 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	-1. 89	3.27
	B	1. 67	0.88
Transversal Direction	A	0. 56	1.84
	B	2. 67	1.15

**Table11. 60° 10 mm tool diameter 1.50 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	18°	14°
	2	19° 40'	5° 20'
	3	20°	2° 20'
Transversal direction	4	21° 40'	13°
	5	18° 40'	13°
	6	21°	13° 20'

**Table12. Cone 60° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.50 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	19.22	1.07
	B	7.22	6.06
Transversal Direction	A	20.44	1.57
	B	13.11	0.19

**Table13. 20° 25 mm. Tool diameter 1.50 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	- 2° 20'	1° 20'
	2	- 2° 40'	1°
	3	- 2° 40'	1°
Transversal direction	4	- 2° 40'	- 20'
	5	- 1° 40'	20'
	6	- 1° 40'	1°

**Table14. Cone 20° wall angle, 25 mm tool diameter and 1.50 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	-2. 56	0.19
	B	1.11	0.19
Transversal Direction	A	-2	0.58
	B	0.33	0. 67

**Table15. 60° 25 mm. Tool diameter 1.50 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	10° 20'	- 9°
	2	5°	- 8° 40'
	3	7° 20'	- 8° 40'
Transversal direction	4	6°	- 12°
	5	6°	- 12°
	6	6°	- 12°

**Table16. Cone 60° wall angle, 25 mm tool diameter and 1.50 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	7. 56	2.67
	B	-8. 78	0.19
Transversal Direction	A	6	0
	B	-12	0

## SHEAR ANGLE MEASUREMENT DC01

**Table17. 10° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	-3° 40'	-10°
	2	-3° 40'	-10°
	3	7°	-9°
Transversal direction	4	7°	-9°
	5	-7°	-9°
	6	-7°	-19° 40'

**Table18. Cone 10° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	-0.11	6.16
	B	-9. 67	0.58
Transversal Direction	A	-2.33	8.08
	B	-12. 56	6.16

**Table19. 20° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	13° 20'	7° 20'
	2	-18°	10°
	3	-10°	10°
Transversal direction	4	-9° 20'	10° 20'
	5	-9° 20'	10° 20'
	6	-	-

**Table20. Cone 20° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	-4. 89	16.28
	B	-9. 11	1.54
Transversal Direction	A	-9. 33	0
	B	-10.33	0

**Table21. 30° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	-6°	2° 40'
	2	-6°	2° 40'
	3	-6°	2° 40'
Transversal direction	4	-11° 40'	0°
	5	-6°	2° 40'
	6	-	-

**Table22. Cone 30° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	-6	0
	B	2.67	0
Transversal Direction	A	-8.83	4.01
	B	1.33	1.89

**Table23. 40° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	3° 40'	1°
	2	18°	1°
	3	15° 40'	1°
Transversal direction	4	2° 40'	4°
	5	10°	1°
	6	10° 20'	1°

**Table24. Cone 40° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	12.44	7.69
	B	1	0
Transversal Direction	A	7. 67	4.33
	B	2	1.73

**Table25. 50° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	10°	10° 40'
	2	8°	10°
	3	16°	10°
Transversal direction	4	16°	10°
	5	12°	7°
	6	-	-

**Table26. Cone 50° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	11.33	4.16
	B	10.22	0.38
Transversal Direction	A	14	2.83
	B	8.5	2.12

**Table27. 55° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	9° 20'	18° 20'
	2	9° 20'	15° 40'
	3	12°	15° 40'
Transversal direction	4	12°	14° 40'
	5	11° 40'	14° 40'
	6	6° 40'	14° 40'

**Table28. Cone 55° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	10.22	1.54
	B	16.56	1.54
Transversal Direction	A	10.11	2.99
	B	14. 67	0

**Table29. 60° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	9° 20'	19°
	2	9° 20'	19°
	3	10° 20'	22°
Transversal direction	4	14° 20'	22°
	5	14° 20'	22°
	6	14° 20'	22°

**Table30. Cone 60° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	9.67	0.58
	B	20	1.73
Transversal Direction	A	14.33	0
	B	22	0

**Table31. 65° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	11° 20'	28°
	2	11° 20'	28°
	3	12° 20'	25°
Transversal direction	4	12° 20'	25°
	5	12° 20'	26° 40'
	6	12° 20'	27°

**Table32. Cone 65° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	11. 67	0.58
	B	27	1.73
Transversal Direction	A	12.33	0
	B	26.22	1.07

**Table33. 66° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	12°	28°
	2	11° 40'	27° 20'
	3	11° 40'	27° 20'
Transversal direction	4	12°	28°
	5	11° 40'	25° 40'
	6	12°	28°

**Table34. Cone 66° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	11. 78	0.19
	B	27.56	0.38
Transversal Direction	A	11.89	0.19
	B	27.22	1.35

**Table35. 67° 10 mm. Tool diameter 1.15 mm. Thickness.**

Direction	Sample	Angle A	Angle B
Rolling direction	1	13° 40'	19° 40'
	2	13° 40'	21° 40'
	3	10° 20'	17°
Transversal direction	4	10° 40'	16° 20'
	5	10° 40'	23° 20'
	6	15° 40'	15°

**Table36. Cone 67° wall angle, 10 mm tool diameter and 1.15 mm thickness. Averages and Standard Deviations (in grades).**

Direction	Angle	Average	Standard deviation
Rolling Direction	A	12.56	1.92
	B	19.44	2.34
Transversal Direction	A	12.33	2.89
	B	18.22	4.48